



TUGAS AKHIR – TL 141584

**ANALISA PENGARUH TEMPERATUR TEMPERING
PADA PERLAKUAN PANAS TERHADAP
PERUBAHAN STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT
MEKANIK COUPLER YOKE ROTARY (AAR-M201
GRADE E)**

Ditri Mahbegi
NRP 2709100014

Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Alvian Toto Wibisono, ST., MT.

PROGRAM STUDI SARJANA
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 141584

**ANALYSIS OF TEMPERING TEMPERATURE IN
HEAT TREATMENT FOR TRANSFORMATION OF
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL
PROPERTIES COUPLER YOKE ROTARY (AAR-
M201 GRADE E)**

Ditri Mahbegi
NRP 2709100014

Advisor Lecturer
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Alvian Toto Wibisono, ST., MT.

DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL
ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA PENGARUH TEMPERATUR *TEMPERING* PADA PERLAKUAN PANAS TERHADAP PERUBAHAN STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK *COUPLER YOKE ROTARY* (AAR-M201 GRADE E)

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DITRI MAHBEGI
NRP. 2709 100 014

Disetujui oleh Tim Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. (Pembimbing I)
2. Alvian Toto W. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan *Alhamdulillah hirobbil 'alamin*, penulis memanjatkan puji dan syukur kehadiran Allah SWT. Berkat segala rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul

**“ANALISA PENGARUH TEMPERATUR *TEMPERING*
PADA PERLAKUAN PANAS TERHADAP PERUBAHAN
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK *COUPLER*
YOKE ROTARY(AAR-M201 GRADE E)”**

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada :

- Bapak - Ibu, orang tua tercinta, atas jasa – jasanya yang tak terhingga dalam mendidik dan membesarkansaya.
- Bapak Ir. RochmanRochiem, M.Sc. sebagai dosen pembimbing yang sangat saya hormati. Terima kasih atas segala bimbingan, masukan, dan saran yang bapak berikan.
- Bapak Alvian Toto Wibisono., S.T., M.Sc. sebagai dosen pembimbing kedua dan sahabat yang terus memberikan semangat.
- Kepada Bapak Dr. Sungging Pintowantoro, ST., MT selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
- Ibu Dian Mughni F., S.T., M.Sc., dan Bapak Tubagus Noor R., S.T., M.Sc., sebagai dosen penguji yang sangat saya hormati.Terima kasih atas segala masukan, pertanyaan dan pencerahan yang diberikan kepada saya.
- Bapak-bapak dan Ibu-ibu dosen jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
- Bapak Beny Andhika, S.T., dan PT. Barata Indonesia (Persero) atas kerja samanya.
- Seluruh teman – teman yang sebagai keluarga kedua penulis di kampus yang telah sepenuhnya mendukung penulis.

- Seluruh pihak yang tidak bias penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari adanya keterbatasan ilmu, tentu laporan ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu saya selaku penulis dengan senang hati menerima kritik dan saran yang bersifat membangun dari para pembaca laporan ini. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat memberimanfaat bagi kita semua. Amin.

Surabaya, desember 2016
Penulis

**ANALISA PENGARUH TEMPERATUR *TEMPERING*
PADA PERLAKUAN PANAS TERHADAP PERUBAHAN
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK *COUPLER*
YOKE ROTARY (AAR-M201 GRADE E)**

Nama Mahasiswa : Ditri Mahbegi
NRP : 2709 100 014
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M. Sc.
Alvian Toto Wibisono, S.T, M.T.

Abstrak

Salah satu bagian penting dari konstruksi komponen kereta api yaitu coupler yoke rotary yang digunakan sebagai penyambung gerbong kereta api. Kegagalan yang sering terjadi adalah ketika coupler yoke rotary sesudah diberikan perlakuan panas, sifat mekanisnya tidak memenuhi standar, sehingga perlu dilakukan proses perlakuan panas lain yaitu hardening dan tempering. Tujuan penelitian ini adalah menganalisa pengaruh temperatur tempering terhadap perubahan struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR M201 Grade E. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur mikro pada baja AAR-M201 Grade E, hasil dari proses tempering pada temperatur 250°C adalah upper bainit. Proses tempering pada temperatur 300°C menghasilkan upper bainit yang lebih kasar. Proses tempering pada temperatur 350°C menghasilkan upper bainit disertai ferit dan perlit. Peningkatan temperatur tempering mengakibatkan struktur menjadi semakin kasar dan perubahan fasa. Perlakuan hardening selama 3 jam disertai tempering pada temperature 350°C selama 1 jam paling mendekati spesifikasi dari sifat mekanik pada baja AAR-M201 Grade E dengan nilai kekuatan luluh 854,53 MPa, kekuatan maksimum 979,16 MPa, persen elongasi 4,13%, dan reduksi area 8,33%. Peningkatan temperatur tempering menurunkan kekuatan luluh, kekuatan

maksimum, dan kekerasan serta meningkatkan keuletan dan energi impak.

Kata kunci : *couple yoke rotary, baja AAR-M201 Grade E, hardening, tempering*

**ANALYSIS OF TEMPERING TEMPERATURE IN HEAT
TREATMENT FOR TRANSFORMATION OF
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES
COUPLER YOKE ROTARY (AAR-M201 GRADE E)**

Student Name : Ditri Mahbegi
NRP : 2709 100 014
Departement : Teknik Material dan Metalurgi
Advicor Lecturer : Ir. Rochman Rochiem M.Sc
Alvian Toto Wibisono S.T, M.T.

Abstract

One of the important parts train construction is couple yoke rotary used for connection of railway carriages. Failure that often occurs after couple yoke rotary got normalizing process and it does tensile test, result from mechanical properties is not meet the standard so that need to do another heat treatment process, that is hardening and tempering. The purpose of this research are analysis of temperature variation of tempering for microstructure transformation of the AAR-M201Grade E steel and analysis of temperature variation of tempering for mechanical properties of the AAR-M201Grade E steel. The result of this research for tempering at 250°C is upper bainit microstructure. The result for tempering at 300°C is upper bainit microstructure with coarse grain. The result for tempering at 350°C are upper bainit, ferrite, and pearlite microstructure. Increasing of tempering temperature make coarse microstructure and transformation phase. Temperature tempering influence mechanical properties of the AAR-M201 Grade E steel. Increasing of tempering temperature decrease yield strength, tensile strength, and hardness, it also increase ductility and impact energy.

Key word : couple yoke rotary, AAR-M201 Grade E steel, hardening, tempering

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	v
Kata Pengantar	vii
Abstrak	ix
Abstract	xi
Daftar Isi	xiii
Daftar Gambar	xv
Daftar Tabel.....	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Paduan.....	5
2.2 Pengaruh Unsur Paduan	5
2.2.1 Model Kombinasi Unsur Paduan pada Kondisi Anil.....	6
2.2.2 Pengaruh Pengerasan Unsur pada Baja	7
2.2.3 Pengaruh Unsur Paduan pada Temperatur Transformasi	7
2.2.4 Pengaruh Unsur Paduan pada Laju Pendinginan Kritis.....	10
2.2.5 Pengaruh Unsur Paduan pada Tempering	10
2.3 Baja AAR-M201 Grade E	10
2.4 Hardening	14
2.5 Tempering	14
2.6 Diagram Tranformasi	20
2.7 Fase Hasil Transformasi	23
2.8 Pengujian Hardenability	31
2.9 Kekerasan Setelah Temper	33

2.10	Pengujian Kekerasan	34
2.11	Pengujian Tarik	34
2.12	Pengujian Impak	35
2.13	Kajian Penelitian Sebelumnya	36

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Diagram Alir Penelitian	39
3.2	Metodologi Penulisan	40
3.3	Bahan Penelitian	40
3.4	Peralatan Penelitian	41
3.5	Metode Penelitian	42
3.5.1	Persiapan Spesimen	42
3.5.2	Perlakuan Panas pada Spesimen	43
3.5.3	Pengujian Tarik	44
3.5.4	Pengujian Kekerasan	45
3.5.5	Pengujian Impak	45
3.5.6	Pengamatan Struktur Mikro	46

BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN

4.1	Analisa Data	49
4.1.1	Struktur Mikro	49
4.1.2	Pengujian Tarik	52
4.1.3	Pengujian Kekerasan	56
4.1.4	Pengujian Impak	58
4.2	Pembahasan	61
4.2.1	Pengaruh Temperatur Tempering terhadap Struktur Mikro Baja AAR-M201 Grade E	61
4.2.2	Pengaruh Temperatur Tempering terhadap Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E	62

BAB V KESIMPULAN

5.1	Kesimpulan	67
5.2	Saran	67

Daftar Pustaka	xxi
Biodata Penulis	xxiii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pengaruh penambahan unsur paduan pada temperatur eutektoid dan kandungan karbon eutektoid	8
Gambar 2.2	Pengaruh Mn dan C pada daerah austenit.....	9
Gambar 2.3	Yoke	13
Gambar 2.4	Skema produk transformasi austenit pada pendinginan dan transformasi martensit pada pemanasan	16
Gambar 2.5	Pengaruh temperatur tempering terhadap kekuatan luluh dan tarik dan keuletan (%RA) (pada temperatur kamar) untuk paduan baja 4340	18
Gambar 2.6	Perbandingan kekuatan impak pada berbagai temperatur pengujian dari baja dengan tiga macam struktur temper yang menghasilkan kekuatan sama, 125.000 psi.....	20
Gambar 2.7	Diagram transformasi isothermal untuk baja paduan rendah. A: Austenit; F: Ferrit; P: Perlit; B: Bainit; M: Martensit	21
Gambar 2.8	Diagram CCT baja paduan mangan (0,2% C, 0,85% Mn, 0,45% Cr, 0,45% Mo). M: Martensit; F: Ferrit; B: Bainit; P: Perlit.....	22
Gambar 2.9	Struktur mikro baja UNS G10150, terdiri atas ferrit (terang) dan perlit (gelap) ...	23

Gambar 2.10	Struktur mikro baja paduan UNS G10200. Strukturnya dinamakan Widmanstätten.....	24
Gambar 2.11	Struktur mikro baja paduan UNS G10400. Strukturnya berupa sementit berbentuk bulat.....	25
Gambar 2.12	Struktur mikro baja karbon UNS G10800. Strukturnya terdiri atas butir-butir perlit.....	26
Gambar 2.13	Struktur mikro <i>lath martensite</i> (atas) dan <i>plate martensite</i> (bawah). Struktur martensit didapat dari proses <i>quenching</i>	27
Gambar 2.14	Struktur mikro martensit temper	28
Gambar 2.15	Struktur mikro bainit dari baja paduan rendah yang telah mengalami perlakuan panas.....	29
Gambar 2.16	Perbedaan <i>upper bainit</i> (B1) (atas), dan <i>lower bainit</i> (B2) (bawah)	30
Gambar 2.17	Struktur mikro granular bainit (B3)	31
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	39
Gambar 3.2	Skematik <i>Y-block</i> baja AAR-M201 Grade E.....	43
Gambar 3.3	Spesimen uji tarik	44
Gambar 3.4	Spesimen uji impak	46
Gambar 4.1	Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah hardening dengan temperatur 900°C. Dietsa meggunakan pikral, perbesaran 1000x	49

Gambar 4.2	Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah perlakuan hardening – tempering dengan temperatur 250°C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x.....	50
Gambar 4.3	Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah perlakuan hardening – tempering dengan temperatur 300°C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x.....	51
Gambar 4.4	Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah perlakuan hardening – tempering dengan temperatur 350°C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x.....	52
Gambar 4.5	Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekuatan luluh dan kekuatan maksimum	53
Gambar 4.6	Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap persen elongasi dan reduksi area	55
Gambar 4.7	Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekerasan (BHN).....	57
Gambar 4.8	Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekuatan impak pada berbagai temperatur (0°C, -40°C, -60°C).....	59
Gambar 4.9	Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekuatan impak pada temperature -40°C	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi kimia baja AAR-M201.....	12
Tabel 2.2	Sifat mekanik pada baja AAR-M201 Grade E.....	13
Tabel 3.1	Komposisi kimia AAR-M201 Grade E..	41
Tabel 3.2	Dimensi Spesimen Uji Tarik	44
Tabel 3.3	Komposisi Etsa Pikral	47
Tabel 4.1	Nilai pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekuatan luluh dan kekuatan maksimum	54
Tabel 4.2	Nilai pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap persen elongasi dan reduksi area	56
Tabel 4.3	Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekerasan (BHN).....	58
Tabel 4.4	Nilai pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekuatan impak pada berbagai temperatur (0°C, -40°C, -60°C).....	60

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara umum penggunaan baja paduan sangatlah luas diaplikasikan di dalam dunia industri. Di dalam industry kereta api baja yang banyak digunakan adalah baja paduan mangan (*manganese steel*) dengan seri penamaan baja AAR-M201. Baja ini memiliki grade A, B, C, D dan E sesuai spesifikasi komposisi kimia dan sifat mekanik yang telah ditentukan oleh *AAR Manual of Standards and Recommended Practices Couplers and Freight Car Draft Components*. Salah satu penggunaan baja paduan mangan dari konstruksi komponen kereta api yaitu *coupler yoke rotary* yang terbuat dari baja AAR-M201 Grade E diproduksi oleh PT.BARATA digunakan sebagai penyambung gerbong kereta api. Kegagalan yang sering terjadi adalah ketika *coupler yoke rotary* sesudah di *normalizing* kemudian dilakukan pengujian tarik, sifat mekanisnya tidak memenuhi standar untuk baja AAR-M201 Grade E. Sifat mekanik merupakan sifat yang menyatakan kemampuan baja ketika menerima beban mekanik seperti gaya, momen, dan energi mekanik. Beban mekanik dapat menimbulkan perubahan bentuk sementara, permanen, bahkan sampai patah. Sehingga, sifat mekanik menggambarkan hubungan respon *deformasi* terhadap beban yang bekerja. Komponen kereta api pada aplikasinya menerima gaya atau beban mekanik, sehingga perlu diketahui karakteristik pembebanan yang menghasilkan deformasi berlebihan bahkan sampai patah, kemudian bisa ditentukan sifat mekanik yang sesuai agar tidak terjadi kegagalan pada material. Sifat mekanik pada suatu baja dipengaruhi oleh struktur mikro. Struktur mikro pada suatu baja paduan tergantung pada beberapa variabel seperti unsur paduan, konsentrasi unsur paduan, dan proses perlakuan panas (temperatur pemanasan, waktu tahan pemanasan, dan laju pendinginan).



Pemberian proses perlakuan panas terhadap baja memiliki bermacam-macam tujuan, untuk homogenisasi struktur mikronya, untuk memperhalus ukuran butirnya, menaikkan kekerasan, menambah keuletan, meningkatkan *machinability* ataupun untuk tujuan lainnya. Maka untuk mendapatkan sifat-sifat tersebut diperlukan proses perlakuan panas yang berbeda. Perbedaan tersebut juga mencakup perbedaan pada tingginya temperatur pemanasan, lamanya waktu tahan pada temperatur pemanasan, laju pendinginan dan media pendinginnya. Semua hal tersebut harus memperhatikan komposisi unsur paduan materialnya.

Proses perlakuan panas yang dilakukan oleh PT.BARATA untuk baja AAR-M201 grade E, seringkali sifat mekanik yang didapatkan tidak sesuai dengan standar walaupun ada beberapa yang sesuai dengan standar. Hal ini disebabkan kurang tepatnya parameter perlakuan panas yang dilakukan. Perlakuan panas yang kurang sesuai dapat menyebabkan sifat mekanik pada benda kerja tidak sesuai yang diinginkan. Begitu juga dengan temperatur pemanasan yang terlalu tinggi dihasilkan butiran yang kasar dan mengakibatkan kurangnya keuletan material tersebut. Selain tingginya temperatur pemanasan hal tersebut juga dipengaruhi oleh laju pendinginan dan media pendingin. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian terhadap parameter yang tepat pada proses perlakuan panas untuk mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan sesuai dengan fungsi komponen peralatan tersebut.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dikaji dalam penelitian *Coupler Yoke Rotary* (AAR-M201 grade E) milik PT. BARATA yaitu:

1. Bagaimana pengaruh temperatur *tempering* terhadap perubahan struktur mikro baja AAR-M201 Grade E?
2. Bagaimana pengaruh temperatur *tempering* terhadap sifat mekanik baja AAR M201-Grade E?



1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisa permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan yaitu:

1. Kondisi bahan diasumsikan homogen baik komposisi kimia maupun struktur.
2. Pengaruh lingkungan diabaikan.
3. Cacat pada material uji diasumsikan tidak ada.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh temperatur *tempering* terhadap perubahan struktur mikro baja AAR-M201 Grade E?
2. Menganalisa pengaruh temperatur *tempering* terhadap sifat mekanik baja AAR M201-Grade E?

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi pengembangan ilmu selanjutnya untuk aplikasi yang lain, serta didalam proses perlakuan panas baja AAR-M201 Grade E agar diperoleh struktur mikro dan sifat mekanik sesuai dengan spesifikasi *AAR Manual of Standards and Recommended Practices Couplers and Freight Car Draft Components*.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Paduan

Baja pada dasarnya adalah paduan besi-karbon, dengan kadar karbon kurang dari 2%. Selain terdiri dari karbon, baja juga terdiri dari unsur lain. Sebagian besar terdiri dari pengotor pada bijih besi (belerang dan fosfor), yang biasanya kadarnya ditekan serendah mungkin, sebagian lagi dari unsur yang digunakan pada proses pembuatan besi/baja (silikon dan mangan). Berdasarkan komposisi kimianya baja dapat dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu baja karbon (*plain carbon steel*) dan baja paduan. Baja karbon, selain terdiri dari besi dan karbon juga terdiri dari mangan kurang dari 0,8%, silikon kurang dari 0,5%, dan unsur lain yang sangat sedikit. Baja paduan adalah baja karbon yang ditambahkan unsur-unsur tertentu dengan tujuan modifikasi sifat mekanik yang diinginkan. (Callister, 2009).

Baja paduan terdiri dari dua jenis yaitu baja paduan rendah dan baja paduan tinggi. Baja paduan rendah (*Low alloy steel*) adalah baja paduan dengan kadar unsur kurang dari 10%, mempunyai kekuatan dan ketangguhan lebih tinggi daripada baja karbon dengan kadar yang sama, selain itu mempunyai keuletan lebih tinggi daripada baja karbon dengan kekuatan yang sama, *hardenability* dan sifat tahan korosi lebih baik. Baja paduan tinggi (*High alloy steel*) adalah baja paduan dengan kadar unsur lebih dari 10%, pada umumnya mempunyai sifat khusus tertentu seperti baja tahan karat, baja perkakas, baja tahan panas, dan lain-lain (Callister, 2009)

2.2 Pengaruh Unsur Paduan

Baja karbon memiliki kelebihan seperti kemudahan pada perlakuan panas dan harga murah, tetapi juga memiliki keterbatasan, seperti *hardenability* rendah, ketahanan oksidasi dan korosi rendah, kekuatan rendah pada temperatur tinggi. Di lain sisi,



baja paduan digunakan karena memiliki sifat-sifat yang tidak bisa diperoleh dari baja karbon. Maka dari itu, sangat penting untuk menentukan unsur paduan dan komposisi unsur yang sesuai untuk memperoleh sifat-sifat yang diinginkan. Unsur-unsur paduan ditambahkan pada baja untuk beberapa tujuan, seperti berikut:

1. Meningkatkan *hardenability*.
2. Meningkatkan ketahanan pada korosi dan oksidasi.
3. Meningkatkan sifat pada temperatur tinggi.
4. Meningkatkan ketahanan pada abrasi.

Unsur-unsur paduan yang ditambahkan pada baja karbon secara umum dapat mempengaruhi beberapa hal berikut, seperti :

1. Unsur paduan dapat membentuk larutan padat atau senyawa intermetalik.
2. Unsur paduan dapat mengubah temperatur transformasi fasa terjadi.
3. Unsur paduan dapat mengubah kelarutan karbon dalam austenit dan ferit
4. Unsur paduan dapat mengubah laju reaksi transformasi austenit menjadi produk dekomposisi dan laju pelarutan sementit menjadi austenit selama pemanasan.
5. Adanya unsur paduan dapat mengurangi penghalusan pada *tempering*.

2.2.1 Model Kombinasi Unsur Paduan pada Kondisi Anil

Penambahan unsur-unsur paduan yang ditambahkan pada baja, seperti nikel, silikon, aluminium, zirkonia, mangan, kromium, tungsten, molibden, vanadium, titanium, fosfor, sulfur, dan tembaga larut pada ferit. Senyawa intermetalik terbentuk ketika baja ditambahkan unsur paduan seperti mangan, kromium, tungsten, molibden, vanadium, dan titanium. Kecenderungan suatu unsur larut dalam ferit atau membentuk karbida, dipengaruhi tendensi suatu unsur untuk larut atau membentuk senyawa (Clark, 1962)

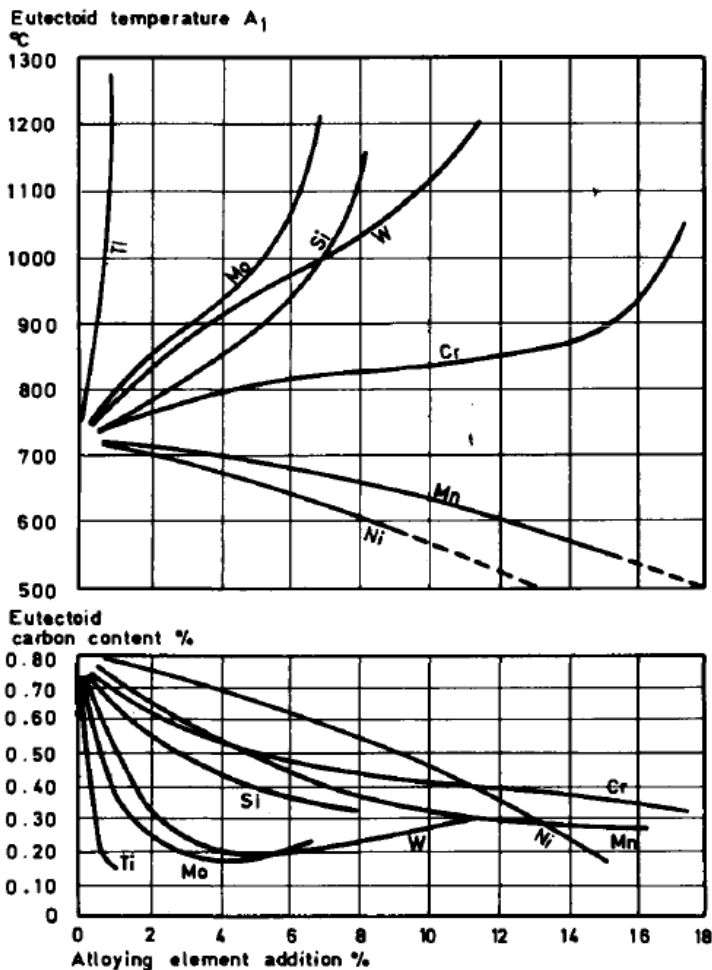


2.2.2 Pengaruh Pengerasan Unsur pada Baja

Unsur paduan yang larut pada ferit bisa meningkatkan kekuatan dan kekerasan. Unsur Mn dan Cr memiliki kelarutan yang sangat tinggi pada ferit sehingga memberikan pengaruh yang kuat pada kekuatan dan kekerasan ferit, meskipun demikian pengaruh unsur paduan terhadap kekuatan dan kekerasan baja secara keseluruhan hampir tidak berarti bila terjadi perubahan struktur mikro. Unsur karbon dan unsur paduan lainnya, seperti kromium, tungsten, vanadium, dan molibden, memiliki pengaruh pengerasan yang baik ketika baja mengalami perlakuan panas (Clark, 1962)

2.2.3 Pengaruh Unsur Paduan pada Temperatur Transformasi

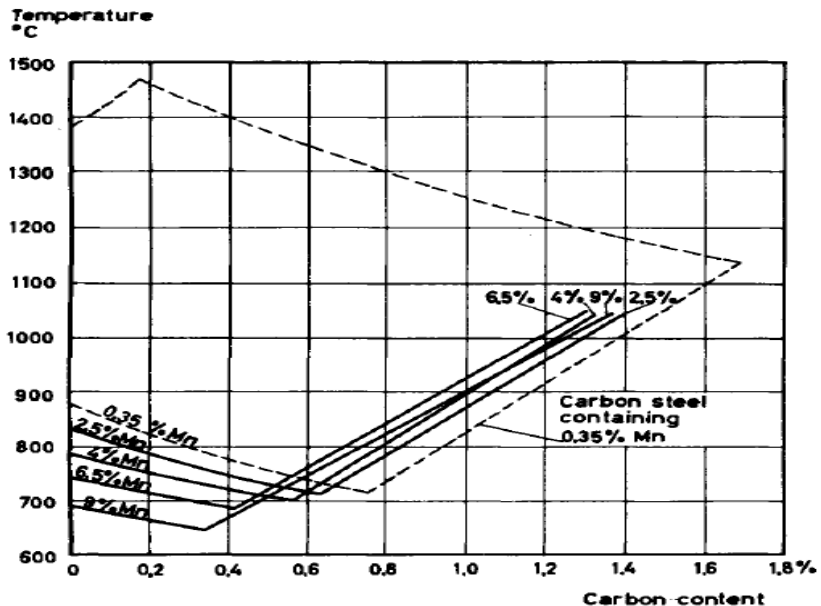
Pengaruh unsur paduan mengubah temperatur transformasi austenit menjadi ferit, hal ini mengubah temperatur transformasi eutektoid. Pengaruhnya bisa menaikkan atau menurunkan temperatur transformasi. Pengaruh beberapa unsur paduan pada temperatur eutektoid dan pengaruh unsur paduan pada kandungan karbon pada eutektoid seperti pada Gambar 2.1. Pada Gambar 2.1, diketahui unsur mangan dan nikel menurunkan temperatur eutektoid, unsur paduan yang lain menaikkan temperatur eutektoid, dan semua unsur paduan menggeser komposisi eutektoid pada kandungan karbon yang lebih rendah.



Gambar 2.1. Pengaruh penambahan unsur paduan pada temperatur eutektoid dan kandungan karbon eutektoid (Thelning, 1984)



Pengaruh unsur seperti mangan terhadap temperatur transformasi dan komposisi eutektoid seperti pada Gambar 2.2. Pada kasus ini, posisi normal temperatur kritis dinyatakan garis putus-putus. Temperatur kritis semakin rendah dan eutektoid terjadi dengan komposisi karbon yang lebih rendah dari komposisi karbon normal. Temperatur kritis turun lebih jauh ketika jumlah unsur paduan Mn dan Ni yang meningkat. Nikel dan mangan meningkatkan perbedaan antara temperatur kritis pada saat pemanasan dan pendinginan yang disebut *austenite-stabilizing elements*. (Thelning, 1984)



Gambar 2.2. Pengaruh Mn dan C pada daerah austenit (Thelning, 1984)



2.2.4 Pengaruh Unsur Paduan pada Laju Pendinginan Kritis

Karakteristik yang signifikan pada unsur paduan adalah mengubah diagram transformasi isothermal. Unsur paduan tidak hanya mengubah temperatur transformasi austenit menjadi perlit pada kondisi setimbang tetapi juga temperatur pada transformasi struktur yang lain. Pengaruh sebagian besar unsur paduan adalah bisa mendapatkan *full hardening* pada laju pendinginan yang lebih rendah daripada laju pendinginan pada baja karbon. Hal ini karena diagram transformasi isothermal bergeser kekanan, sehingga membutuhkan waktu yang lebih banyak untuk memulai dan mengakhiri transformasi austenit. Meskipun temperatur transformasi kesetimbangan turun oleh nikel dan naik oleh kromium, laju pendinginan kritis berkurang oleh kedua unsur tersebut (Clark, 1962)

2.2.5 Pengaruh Unsur Paduan pada Tempering

Baja yang telah dikeraskan akan melunak bila dipanaskan kembali (*tempering*). Makin tinggi temperatur *tempering* maka makin banyak penurunan kekerasan yang terjadi. Semua unsur paduan menghambat laju penurunan kekerasan karena tempering. Unsur-unsur yang mudah larut dalam ferit, unsur yang tidak membentuk karbida, seperti Ni, Si, dan Mn pengaruhnya kecil sekali. Unsur pembentuk karbida mempunyai pengaruh yang lebih kuat, seperti Cr, W, Mo, V dan lain-lain, pengaruhnya kuat sekali. Bukan saja akan menghambat penurunan kekerasan, bahkan dalam jumlah besar dapat menaikkan kekerasan pada *tempering* pada temperatur tinggi.

2.3 Baja AAR M201 Grade E

Coupler adalah alat yang digunakan untuk menyambung 2 *rolling stock* pada gerbong kereta api. Setiap



gerbongnya dapat mengangkut sekitar 100-150 ton. Terdapat banyak beban yang terlibat pada setiap jarak gerbong. Coupler berperan penting di setiap penyambungan 2 gerbong. Knuckle salah satu komponen pengunci pada coupler. AAR (American Association of Railroads) coupler juga dikenal sebagai knuckle coupler, janney coupler, alliance coupler. Coupler tipe E diproduksi pertama kali pada tahun 1932 dimana tidak saling mengunci dalam arah vertical. Terdapat banyak penyebab terjadinya kegagalan pada knuckle di dalam coupler. Beberapa kegagalan produksi terjadi akibat kegagalan pada proses casting dan perlakuan panas. (Seshu, 2010)

Baja AAR-M201 Grade E diproses menggunakan beberapa proses seperti *open hearth*, *electric furnace*, *crucible*, *converter*, atau *basic oxygen*. Produk coran harus dibersihkan sebelum dilakukan proses perlakuan panas. Prosedur perlakuan panas *hardening* dan tempering yang perlu diperhatikan sebagai berikut:

1. Setelah penuangan, baja hasil coran dibiarkan mendingin sampai temperatur dibawah 538°C , sampai dilakukan perlakuan panas pada laju yang tidak berbahaya bagi baja cor.
2. Panaskan sampai temperatur yang seragam di atas rentang temperatur transformasi dan tahan selama waktu tertentu untuk mencapai austenitisasi dan menghaluskan struktur butir.
3. Benda coran dikeluarkan dari *furnace* dan sementara benda cor berada diatas rentang temperatur transformasi, lakukan pendinginan cepat dengan *liquid* sampai temperatur dibawah rentang transformasi.
4. Temper dengan memanaskan kembali sampai temperatur dibawah rentang transformasi, tetapi tidak boleh kurang dari 430°C . Tahan selama waktu yang diperlukan, dikeluarkan dari *furnace*, dan dibiarkan dingin pada laju tertentu.



Komposisi kimia pada benda kerja yang terbuat dari baja AAR-M201 Grade E harus memiliki komposisi kimia seperti pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2.1 Komposisi kimia baja AAR-M201

	AAR-M201 Grade C,D, dan E
Karbon, persentase maksimum	0,32
Mangan, persentase maksimum	1,85
Fosfor, persentase maksimum	0,04
Sulfur, persentase maksimum	0,04
Silikon, persentase maksimum	1,50

*(AAR Manual of Standards and Recommended Practices
Couplers and Freight Car Draft Component Specification M-
201-00)*

Jika ditinjau dari komposisi kimia pada Tabel 2.1, maka baja AAR-M201 Grade E merupakan baja mangan. Baja paduan ini dikatakan baja mangan karena mengandung lebih dari 0,8% Mn. Mangan dapat menaikkan kekuatan dan kekerasan, dan hal ini lebih efektif pada kadar karbon yang lebih tinggi. Baja mangan ini banyak digunakan untuk *power shovel bucket* dan *teeth, grinding & crushing machinery* dan komponen kereta api. Pada baja AAR-M20 Grade E digunakan pada komponen *yoke*, seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Yoke

Baja AAR-M201 Grade E yang digunakan pada komponen kereta api, harus memenuhi persyaratan sifat mekanik seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sifat mekanik pada baja AAR-M201 Grade E

Sifat mekanik	AAR-M201 Grade E
Kekuatan tarik, ksi	120
Kekuatan luluh, ksi	100
Elongasi pada 2", %	14
Reduksi area, %	30

*(AAR Manual of Standards and Recommended Practices
Couplers and Freight Car Draft Component Specification M-
201-00)*



2.4 Hardening

Hardening merupakan proses perlakuan panas dengan mendinginkan logam secara cepat kedalam media pendingin dari temperatur austenitisasi atau perlakuan larutan (*solution treating*), pada umumnya pada rentang 815-870°C. Pada baja tahan karat dan baja paduan tinggi perlakuan *hardening* untuk meminimalisasi adanya karbida pada batas butir atau untuk meningkatkan distribusi ferit tetapi pada baja karbon, paduan rendah, dan perkakas, *hardening* digunakan untuk mengontrol jumlah martensit yang terbentuk pada struktur mikro (*ASM Metals Handbook Vol.04*, 1991).

Proses perlakuan *hardening* dilakukan dengan memanaskan baja hingga mencapai temperatur austenitisasi, ditahan beberapa waktu tertentu pada temperatur tersebut, lalu didinginkan dengan cepat ke dalam media pendingin (*quenching*), sehingga diperoleh martensit. Pada suatu benda kerja yang dikeraskan maka kekerasan yang terjadi akan tergantung pada seberapa banyak martensit yang terbentuk dan kekerasan martensit itu sendiri. Banyaknya martensit yang terjadi tergantung pada seberapa banyak austenit yang terjadi pada saat pemanasan dan seberapa cepat pendinginannya sedangkan kekerasan martensit tergantung pada kadar karbon dalam baja yang terlarut dalam austenit.

Beberapa hal yang mempengaruhi kekerasan setelah proses pengerasan diantaranya temperatur austenitisasi, waktu tahan austenitisasi, laju pendinginan, kondisi permukaan benda kerja, ukuran/berat benda kerja yang dikeraskan, dan *hardenability* baja (Avner, 1974)

2.5 Tempering

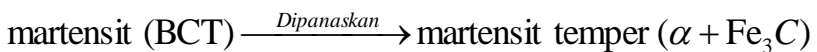
Tempering adalah proses pemanasan kembali baja yang telah dikeraskan sampai temperatur dibawah temperatur kritis terendah (A_1), lalu didinginkan pada laju yang diinginkan. Proses



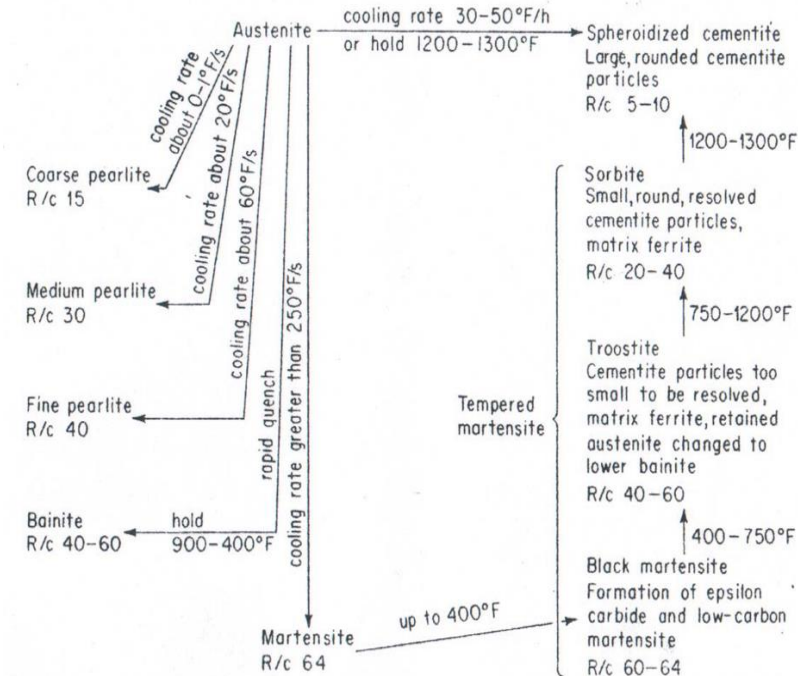
ini bertujuan untuk mengembalikan sebagian keuletan/ketangguhan, berakibat turunnya kekerasan, dan melepas tegangan dalam untuk memperoleh keuletan yang lebih baik (Clark, 1962). Struktur martensit dihasilkan dari proses *quenching*, maka dari itu ada tegangan internal besar, diperoleh dari transformasi martensit, sehingga keuletan berkurang. *Tempering* dapat meningkatkan keuletan dan ketangguhan, yang sangat penting untuk meningkatkan penyerapan energi impak dan struktur martensit temper menghasilkan kekuatan dinamik yang baik pada baja (LI Hong-ying, 2013)

Martensit merupakan suatu struktur yang metastabil, bila dipanaskan kembali secara bertahap karbon yang terperangkap dalam struktur BCT dari martensit tersebut akan keluar menjadi karbida sehingga BCT akan menjadi BCC, ferrit. Proses pemanasan kembali dan pendinginan lambat yang mengikutinya dinamakan *tempering*.

Tempering dilakukan dengan memanaskan suatu baja yang memiliki struktur mikro martensit sampai temperatur dibawah eutektoid dalam waktu tertentu. Pada umumnya *tempering* dilakukan pada temperatur antara 250 sampai 650°C, meskipun tegangan internal dapat lepas pada temperatur sekitar 200°C. Perlakuan panas melalui mekanisme difusi, pembentukan martensit temper seperti transformasi dibawah ini;



pada transformasi diatas fasa tunggal martensit BCT, yang jenuh dengan karbon, bertransformasi menjadi martensit temper, terdiri dari ferit stabil dan fasa sementit (Callister, 2009)

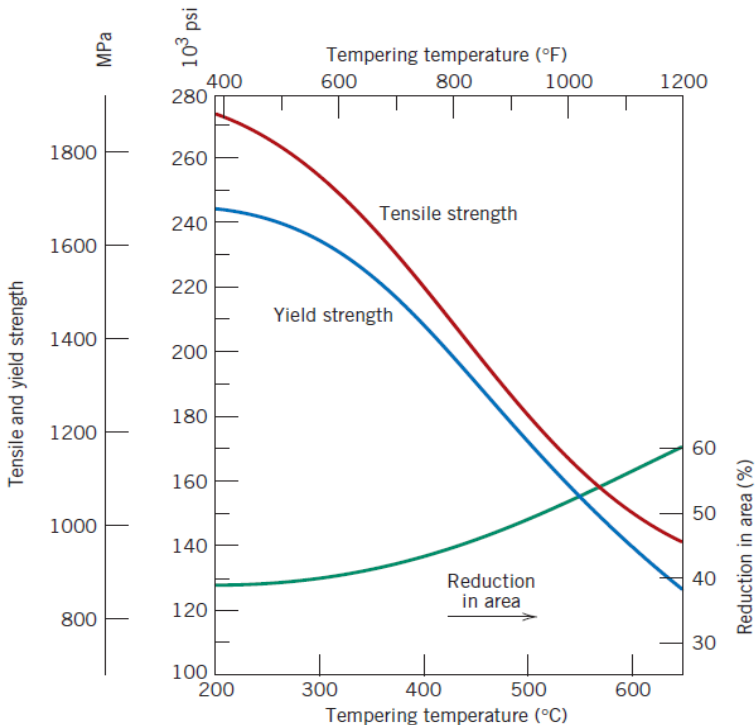


Gambar 2.4. Skema produk transformasi austenit pada pendinginan dan transformasi martensit pada pemanasan (tempering) (Avner, 1974)

Perubahan struktur yang terjadi setelah proses tempering pada pemanasan temperatur tertentu, secara skematik digambarkan pada Gambar 2.4. Pada temperatur temper yang masih rendah, di bawah 205°C , karbon yang keluar masih sangat sedikit, karbida yang terjadi, dinamakan karbida epsilon (ϵ carbide), masih sangat



kecil, belum tampak di mikroskop (*submicroscopic*), martensit tampak lebih hitam, dinamakan *black martensite*. Pada tahap ini terjadi penurunan tegangan dalam, sedang kekerasan hampir tidak berkurang (masih 60 – 64 HRC), bahkan dapat terjadi sedikit kenaikan (untuk baja dengan kadar karbon tinggi). Pada temperatur temper yang lebih tinggi, 205 – 400 °C, karbida epsilon mulai berubah menjadi sementit, Fe_3C , dan austenit sisa bertransformasi, menjadi bainit atau martensit. Struktur yang terjadi dinamakan *troostite*, terdiri dari partikel sementit yang sangat halus (*submicroscopic*) dengan matriks ferrit dan austenit yang telah bertransformasi. Mulai tampak penurunan kekerasan (40 – 60 HRC) dan kenaikan keuletan yang berarti. Pada temperatur temper yang lebih tinggi lagi, 400 – 650 °C, sementit tumbuh menjadi lebih besar, berbentuk spheroid yang halus dan BCT menjadi BCC sempurna. Struktur ini dikenal dengan nama *sorbite*, terdiri dari spheroid sementit yang sangat halus yang tersebar dalam matriks ferrit, kekerasan lebih rendah (20 – 40 HRC) dan keuletan/ketangguhan makin tinggi. Bila pemanasan diteruskan lebih tinggi lagi spheroid sementit tumbuh lebih besar dengan matriks ferrit. Struktur ini sama dengan yang diperoleh dengan proses spheroidisasi, kekerasannya rendah (5 – 10 HRC) dan keuletan/ketangguhannya tinggi.



Gambar 2.5. Pengaruh temperatur *tempering* terhadap kekuatan luluh dan tarik dan keuletan (%RA) (pada temperatur kamar) untuk paduan baja 4340 (Callister, 2009)

Pengaruh temperatur penemperan terhadap sifat mekanik ditunjukkan pada gambar 2.5. Perubahan struktur selama penemperan sangat gradual, sehingga tidak jelas perbedaan struktur yang satu dengan yang berikutnya. Karenanya ada yang menamakan semua produk dekomposisi martensit ini sebagai *martensit temper*. Karbon yang keluar dari struktur martensit maka tegangan didalam BCT akan berkurang sehingga kekerasan/kuatannya juga berkurang selain itu



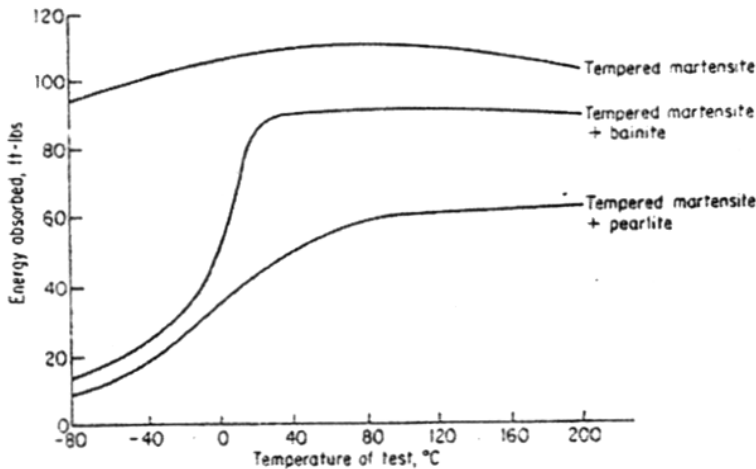
keuletan/ketangguhan semakin meningkat. Secara umum dapat dikatakan bahwa bila temperatur penemperan makin tinggi maka kekerasannya akan makin rendah (Avner, 1974).

Pada proses tempering, kekerasan setelah tempering tidak hanya tergantung pada temperatur temper tetapi juga pada waktu tahan pada temperatur tersebut. Hubungan antara temperaatur dan waktu tahan dinyatakan sebagai *Hollomon-Jaffe parameter* (HJP). Parameter ini pada umumnya digunakan pada analisa parameter *tempering* martensit dan analisis evolusi sifat mekanik selama *tempering*. Persamaan *Hollomon-Jaffe* seperti persamaan berikut:

$$HJP = T(\log(t) + C) \quad (2.1)$$

Dimana T adalah temperatur *tempering* dalam Kelvin, t adalah waktu dalam jam, dan C adalah konstanta material, pada baja C bernilai 20.

Pada penemperan diharapkan baja menjadi lebih tangguh disamping memiliki kekuatan/kekerasan yang cukup. Baja dengan kekerasan yang cukup tinggi dapat diperoleh dengan membentuk struktur mikro yang seluruhnya martensit, campuran martensit dan bainit atau campuran martensit dan perlit. Untuk membandingkan ketangguhan baja yang satu dengan yang lain maka perbandingan dilakukan pada tingkat kekuatan/kekerasan yang sama dan ketangguhan diuji pada temperatur yang sama, salah satu hasil pengujian seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Perbandingan kekuatan impact pada berbagai temperatur pengujian dari baja dengan tiga macam struktur temper yang menghasilkan kekuatan sama, 125.000 psi (Avner, 1974)

2.6 Diagram Transformasi

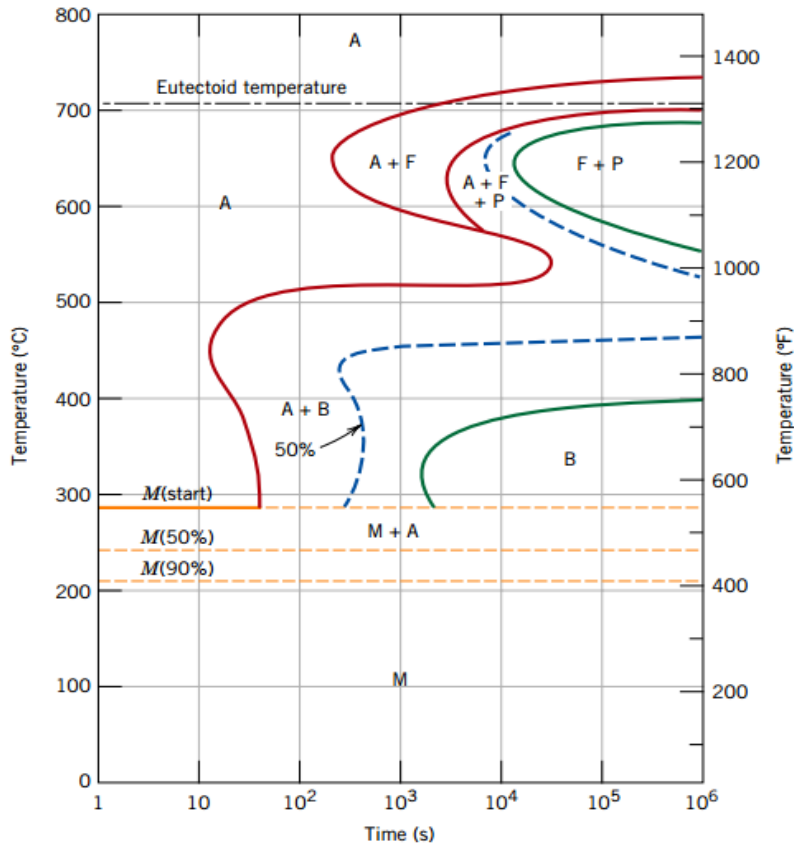
Untuk mengetahui proses transformasi yang terjadi pada mikrostruktur baja selama proses perlakuan panas, digunakan diagram transformasi. Diagram transformasi menunjukkan hubungan antara laju pendinginan dengan struktur mikro yang terbentuk. Ada dua jenis diagram transformasi yang sering digunakan yaitu:

- Diagram Transformasi Isothermal

Diagram transformasi isothermal menunjukkan transformasi struktur mikro baja pada kondisi temperatur yang konstan pada gambar 2.7. Diagram ini lebih digunakan



pada proses perlakuan panas tertentu seperti martempering ataupun austempering.

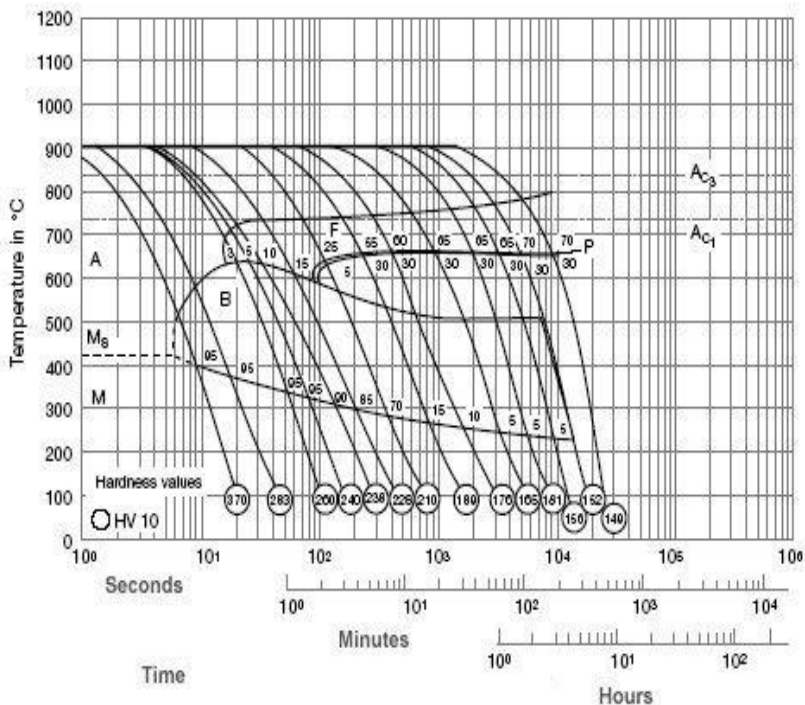


Gambar 2. 7 Diagram transformasi isothermal untuk baja paduan rendah. A: Austenit; F: Ferrit; P: Perlit; B: Bainit; M: Martensit.
(Callister, 2009)



- Diagram Transformasi Pendinginan Kontinyu/ Continuous Cooling Transformation (CCT)

Diagram CCT digunakan pada proses perlakuan panas yang memiliki pendinginan kontinyu, seperti *quenching* pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Diagram CCT baja paduan mangan (0,2% C, 0,85% Mn, 0,45% Cr, 0,45% Mo). M: Martensit; F: Ferrit; B: Bainit; P: Perlit. (Warmuzek, 2004)

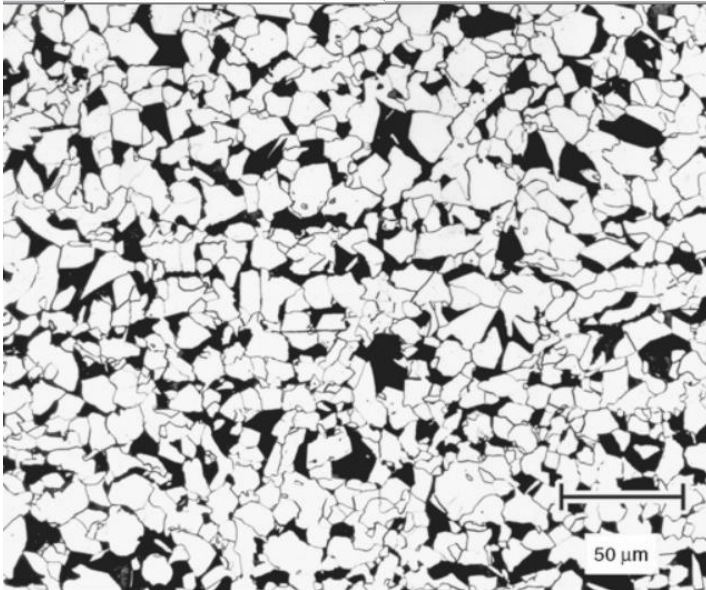


2.7 Fase Hasil Transformasi

Proses perlakuan panas akan menghasilkan beberapa jenis fasa. Fasa yang terbentuk dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya komposisi kimia, temperatur transformasi, dan laju pendinginan. Jenis fasa yang tercipta pada baja adalah sebagai berikut:

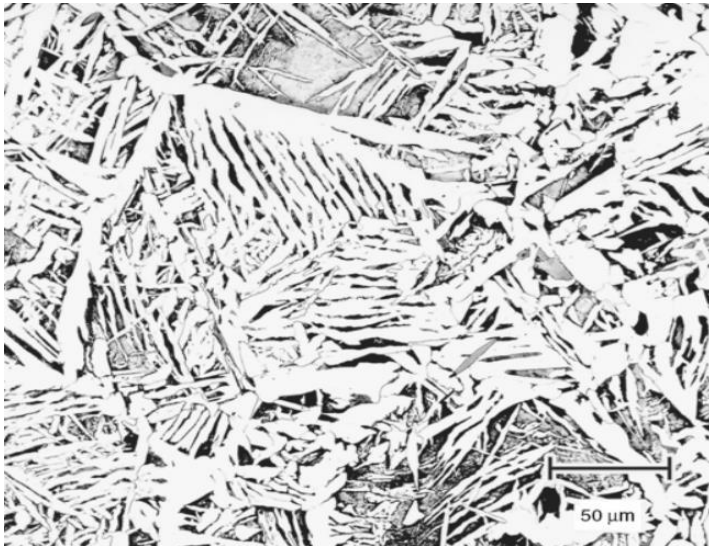
- Ferrit

Ferrit (α -iron) merupakan fasa yang stabil pada temperatur ruang, tercipta pada kondisi equilibrium. Ferrit mempunyai struktur BCC (Body Centered Cubic) dengan kekerasan yang relatif rendah. Ada juga jenis ferrite yang stabil pada temperatur tinggi yaitu delta ferrit (δ -iron). Ferrit jenis ini bersifat isomorph terhadap ferrit alpha pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Struktur mikro baja UNS G10150, terdiri atas ferrit (terang) dan perlit (gelap). (*Warmuzek, 2004*)

Ferrit pada umumnya mempunyai ukuran butir yang relatif besar dengan bentuk poligonal. Namun ada juga struktur ferrit yang berbentuk *accicular* (seperti jarum) yang disebut struktur Widmanstatten pada gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Struktur mikro baja paduan UNS G10200. Strukturnya dinamakan Widmanstatten (*Warmuzek, 2004*)

- Austenite

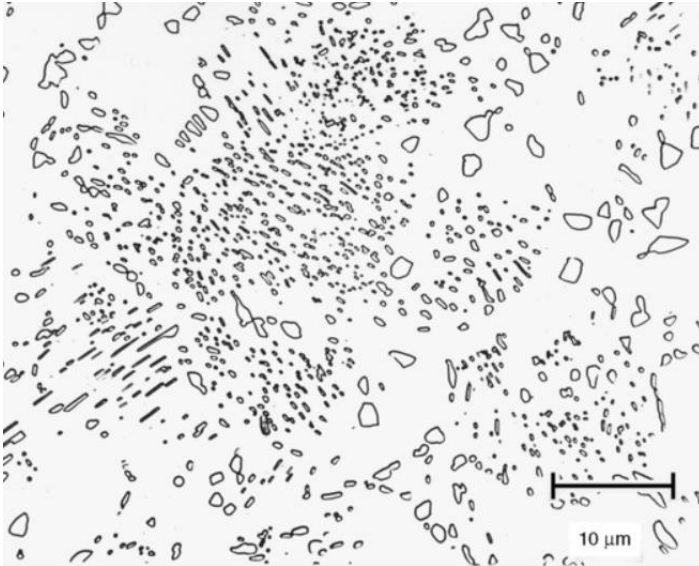
Austenite (γ -iron) merupakan fase yang stabil pada temperatur yang relatif tinggi. Austenit memiliki kelarutan karbon yang cukup tinggi, jauh lebih tinggi dibanding ferrit. Austenit memiliki struktur kristal FCC (Face Centered Cubic).

- Sementit

Sementit merupakan fasa yang terbentuk dari senyawa Fe_3C . Sementit mempunyai struktur kristal ortorombik yang cukup



kompleks, dengan nilai kekerasan yang tinggi. Bersifat metastabil.



Gambar 2. 11 Struktur mikro baja paduan UNS G10400. Strukturnya berupa sementit berbentuk bulat (Warmuzek, 2004)

Struktur sementit dengan bentuk *spheroid* seperti pada Gambar 2.11 terbentuk dengan proses pemanasan dengan temperatur dibawah A1 selama beberapa jam.

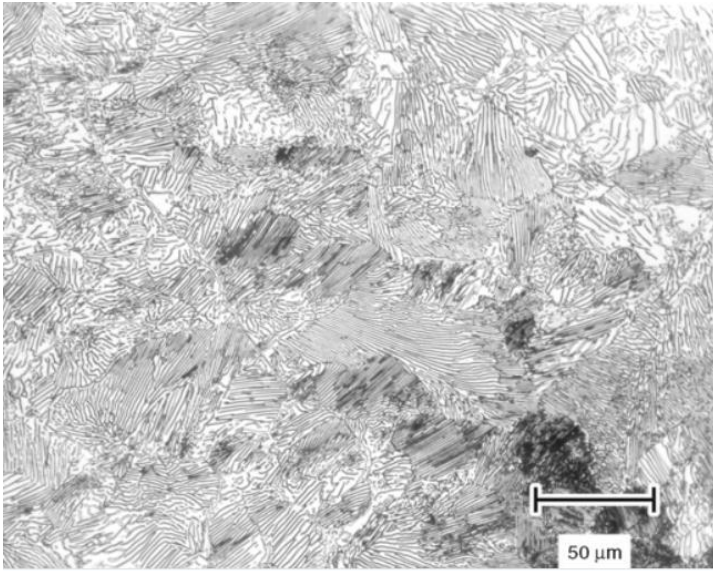
- Grafit

Grafit mempunyai struktur kristal heksagonal dan bersifat stabil. Kekerasan yang dimiliki grafit cukup tinggi.

- Perlit



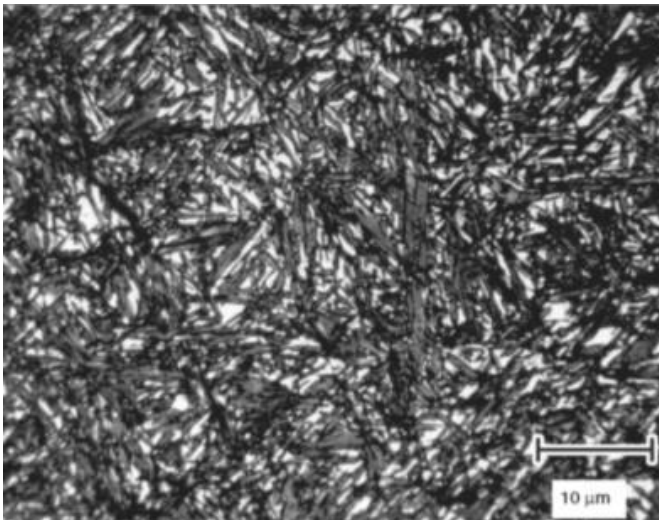
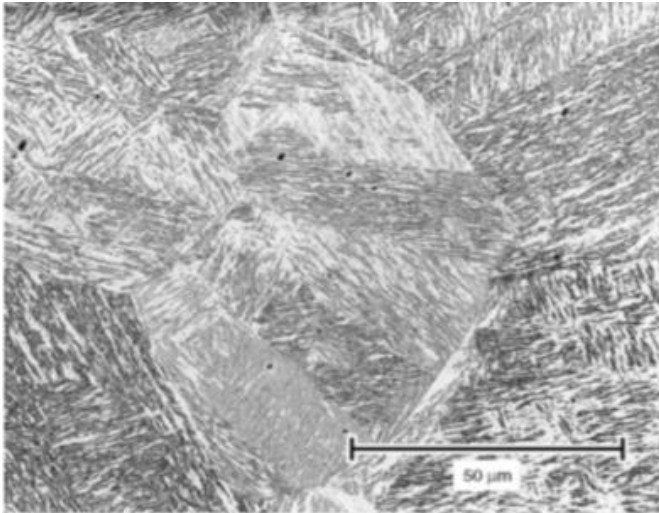
Perlit merupakan struktur yang bersifat metastabil, terdiri dari campuran ferrit dan sementit dengan bentuk *lamellar*.



Gambar 2. 12 Struktur mikro baja karbon UNS G10800. Strukturnya terdiri atas butir-butir perlit (*Warmuzek, 2004*)

- Martensite

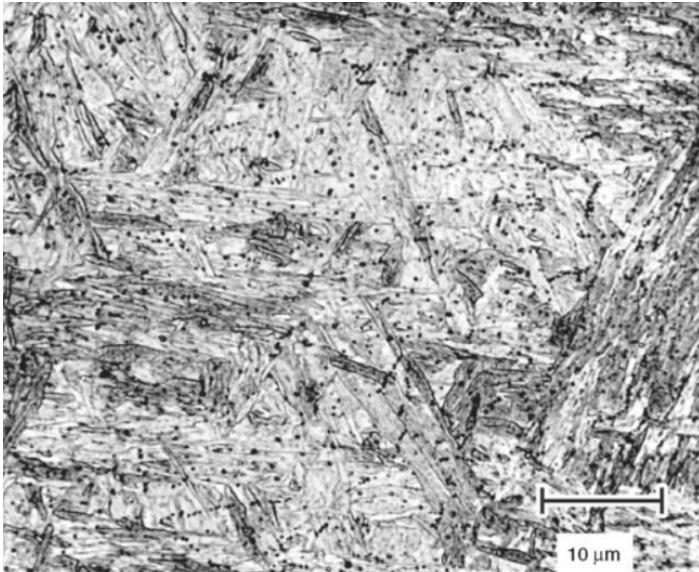
Martensite memiliki struktur kristal BCT (Body Centered Tetragonal). Martensit mempunyai kandungan karbon yang sangat jenuh dalam ferritnya. Bersifat metastabil, dengan kekerasan yang tinggi. Morfologinya berbentuk *lath* saat kadar karbon besi $<0,6$ wt% dan berbentuk *plate* saat kadar karbon $>1,0$ wt% seperti gambar 2.11.



Gambar 2. 13 Struktur mikro *lath martensite* (atas) dan *plate martensite* (bawah). Struktur martensit didapat dari proses *quenching* (Warmuzek, 2004)



Saat martensit mengalami proses *tempering*, maka struktur yang terbentuk adalah martensit temper pada gambar 2.14. Struktur ini terdiri atas martensit dengan bilah yang lebih kasar dan butiran-butiran kecil karbida yang mengalami presipitasi.



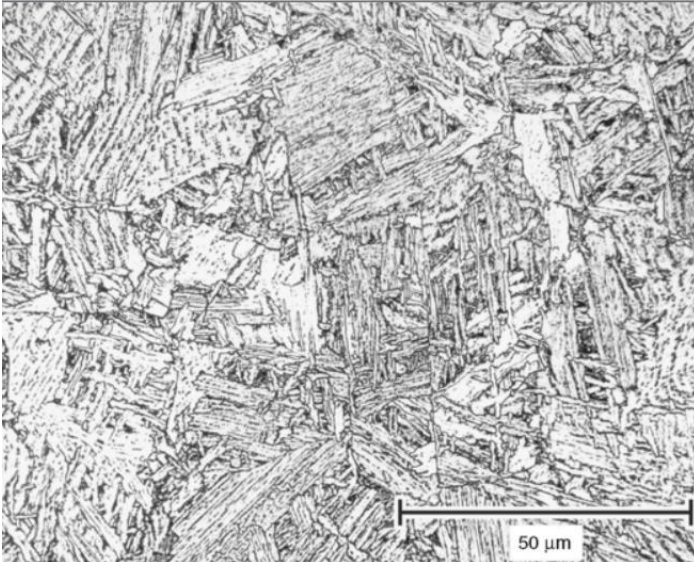
Gambar 2. 14 Struktur mikro martensit temper (*Warmuzek, 2004*)

- Bainit

Bainit adalah struktur yang terbentuk dari ferrit dan sementit dengan ukuran sangat halus. Namun tidak seperti perlit, strukturnya tidak berbentuk *lamellar*. Bainit dibagi menjadi dua, *lower bainite* dengan bentuk *feathery* (menyerupai bulu) dan *upper bainite* dengan bentuk *accicular* (menyerupai jarum). *Upper bainite* terbentuk pada temperatur transformasi yang cenderung tinggi, sementara



lower bainit terbentuk pada temperatur yang lebih rendah, saat pendinginan berlangsung secara isothermal. Kekerasan pada bainit akan meningkat seiring dengan turunnya temperatur transformasinya. (Warmuzek, 2004)

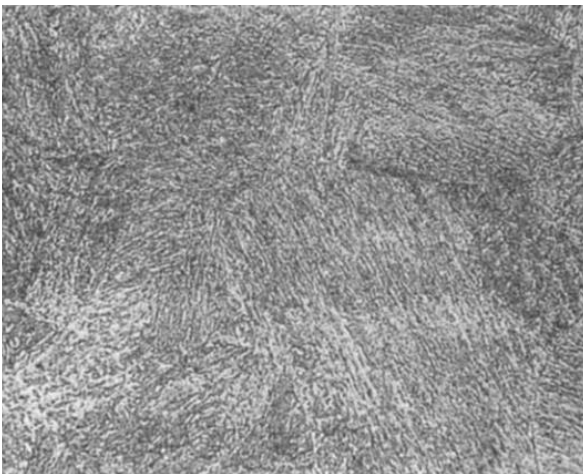


Gambar 2. 15 Struktur mikro bainit dari baja paduan rendah yang telah mengalami perlakuan panas (Warmuzek, 2004)

Namun pada proses manufaktur, umumnya baja mengalami pendinginan secara kontinyu, bukan isothermal. Sehingga istilah *upper bainite* dan *lower bainit* tidak lagi relevan dalam proses pendinginan kontinyu. Bainit kemudian diidentifikasi berdasarkan morfologinya, dan dibedakan menjadi bainit *Class 1* (B1), *Class 2* (B2), dan *Class 3* (B3). B1 mempunyai morfologi matrix ferrit yang berbentuk bilah (*accicular*) disertai dengan sementit yang berada di dalam bilah ferrit. B2 terdiri dari matrix bilah ferrit disertai dengan



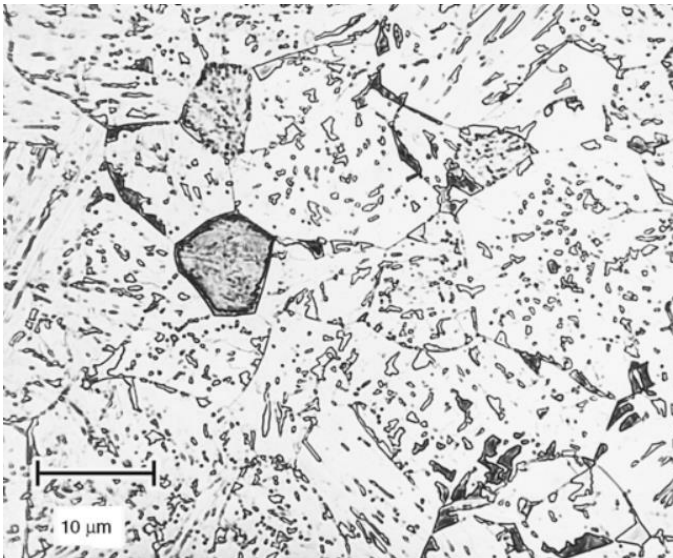
sementit yang berada di batas butir antar bilah ferrit (grain boundary). B1 dapat mewakili istilah *upper bainit*, sementara B2 mewakili *lower bainit*. (Bramfitt, 2002)



Gambar 2. 16 Perbedaan *upper bainit* (B1) (atas), dan *lower bainit* (B2) (bawah) (Bramfitt, 2002)



B3 terdiri atas matriks ferrit dengan partikel-partikel yang terdiri dari martensit ataupun austenit sisa. B3 biasa dikenal dengan istilah *granular bainit* pada gambar 2.17. (Bramfitt, 2002)



Gambar 2. 17 Struktur mikro granular bainit (B3) (Warmuzek, 2004)

2.8 Pengujian Hardenability

Hardenability pada dasarnya tergantung pada diagram transformasi, karena itu akan tergantung pada dua factor utama yaitu komposisi kimia (kadar karbon dan unsur paduan) dan ukuran butir (grain size) austenite. Untuk mengukur hardenability suatu baja ada dua cara yaitu dengan Grossman dan Jominy. (Suherman, 2001)



1. Pengujian Hardenability Grossman

Untuk pengujian hardenability dengan cara Grossman ini baja yang akan diuji dibuat menjadi sejumlah specimen berbentuk batang silindrik dari berbagai diameter. Lalu semuanya dikeraskan dengan pendinginan celup pada suatu media pendinginan tertentu. Dengan metalografi dicari suatu batang yang pada intinya terdapat tepat 50% martensit. Diameter batang ini dinamakan diameter kritis D_0 (critical diameter). (Suherman, 2001)

2. Pengujian Hardenability Jominy

Pengujian ini disebut juga *end quench hardenability test* karena pada pengujian ini digunakan specimen berbentuk batang silindrik berdiameter 1" (25 mm) panjang 4" (100 mm) yang didinginkan pada salah satu ujungnya.

Field mengembangkan metoda berdasarkan asumsi bahwa: (1) kekerasan di titik Jominy pertama (1/16" dari ujung), dinamakan *initial hardness (IH)*, hanya tergantung pada kadar karbon, (2) kekerasan pada titik Jominy selanjutnya, dinamakan *distance hardness (DH)*, adalah fungsi D_1 , dan (3) perbandingan IH/DH , dinamakan factor pembagi, adalah fungsi konstanta dari diameter kritis ideal. Kekerasan pada suatu titik Jominy:

$$DH = \frac{IH}{DF} \quad (2.2)$$

Just mengembangkan perhitungan kekerasan titik jominy yang juga didasarkan pada asumsi yang hampir sama dengan asumsi yang digunakan *Field*. Hanya saja *Just* mengembangkan



gagasannya dalam bentuk rumus-rumus untuk menghitung secara langsung kekerasana pada titik-titik Jominy.

Untuk jarak 0-6 mm hanya karbon yang dianggap berpengaruh terhadap kekerasan (dianggap dapat mencapai CCR), sehingga kekerasan untuk jarak 0-6 mm dapat dihitung dengan :

$$J_0 = 60 \times \sqrt{C} + 20 \text{ HRC} \quad (C < 0,6 \%) \quad (2.3)$$

Untuk jarak Jominy 6 – 80 mm kekerasan dapat dihitung dengan :

$$J_{6-80} = 95\sqrt{C} - 0,0028 s^2\sqrt{C} + 20Cr + 38Mo + 14Mn + \\ 6Ni + 6Si + 39V + 96P - 0,8K - 12\sqrt{s} + 0,9s - \\ 13HRC \quad (2.4)$$

Dimana :

- J = Jominy hardness (HRC)
- s = Jominy distance (mm)
- K = ASTM grain size number

Symbol unsur menunjukkan persentase kadar unsur tersebut. (Suherman, 2001)

2.9 Kekerasan Setelah Temper

Unsur paduan, selain mempermudah terjadinya martensit juga menghambat dekomposisi martensit pada saat penemperan. *Jaffe* dan *Gordon* membuat suatu formula untuk memperhitungkan temperature temper bila diinginkan harga kekerasan setelah tempering tertentu berdasarkan komposisi kimia dari baja tersebut. Rumus ini berlaku dengan asumsi bahwa dengan pengerasan diperoleh struktur martensitic. Rumusnya :



$$T_F = 30 (H_c - H_a) \quad \text{atau} \quad T_C = 16,67 (H_c - H_a) - 17,8 \quad (2.5)$$

Dimana :

$T_F(T_C)$ = Temperatur temper dalam $^{\circ}\text{F}$
 H_c = Kekerasan Rc dihitung berdasarkan komposisi kimia

H_a = Kekerasan Rc setelah tempering (untuk waktu temper 4 jam)

(Suherman, 2001)

2.10 Pengujian Kekerasan

Metode yang digunakan pengujian kekerasan Brinell untuk material berbahan logam. Uji kekerasan ini berupa pembentukan lekukan pada permukaan logam menggunakan indenter. Indenter untuk brinell berbentuk bola dengan diameter 10mm, diameter 5mm, diameter 2,5mm, dan diameter 1mm, itu semua adalah diameter bola standar internasional. Rumus penghitungan pengujian metoda Brinell:

$$\text{BHN} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.6)$$

Dimana :

BHN = Brinell Hardness Number
P = Beban yang diberikan (kgf)
D = Diameter indenter (mm)
d = Diameter lekukan rata-rata hasil indentasi
(ASTM, E10)

2.11 Pengujian Tarik

Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metaurgi



Metode uji ini mencakup pengujian tegangan pada bahan logam dalam bentuk apapun pada suhu normal. Pengujian tarik ini dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat mekanis suatu material, khususnya logam diantara sifat-sifat mekanis yang dapat diketahui dari hasil pengujian tarik adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan tarik
2. Kuat luluh dari material
3. Keuletan dari material
4. *Modulus elastic* dari material
5. Kelentingan dari suatu material
6. Ketangguhan.

(ASTM, E8 M)

2.12 Pengujian Impak

Uji impact adalah pengujian dengan menggunakan pembebanan yang cepat (*rapid loading*). Pengujian impact merupakan suatu pengujian yang mengukur ketahanan bahan terhadap beban kejut. Inilah yang membedakan pengujian impact dengan pengujian tarik dan kekerasan, dimana pembebanan dilakukan secara perlahan-lahan.

Pada uji impact terjadi proses penyerapan energi yang besar ketika beban menumbuk spesimen. Energi yang diserap material ini dapat dihitung dengan menggunakan prinsip perbedaan energi potensial. Dasar pengujiannya yakni penyerapan energi potensial dari pendulum beban yang berayun dari suatu ketinggian tertentu dan menumbuk benda uji sehingga benda uji mengalami deformasi. Pada pengujian impact ini banyaknya energi yang diserap oleh bahan untuk terjadinya perpatahan merupakan ukuran ketahanan impact atau ketangguhan bahan tersebut.

Sifat keuletan suatu bahan dapat diketahui dari pengujian tarik dan pengujian impact, tetapi dalam kondisi beban yang berbeda. Beban pada pengujian impact seperti yang telah



dijelaskan diatas adalah secara tiba-tiba, sedangkan pada pengujian tarik adalah perlahan-lahan. Dari hasil pengujian tarik dapat disimpulkan perkiraan dari hasil pengujian impact. Tetapi dari pengujian impact dapat diketahui sifat ketangguhan logam dan harga impact untuk temperatur yang berbeda-beda, mulai dari temperatur yang sangat rendah (-30°C) sampai temperatur yang tinggi. Sedangkan pada percobaan tarik, temperatur kerja adalah temperatur kamar. (ASTM, E 23)

2.13 Kajian Penelitian Sebelumnya

Penelitian yang dilakukan, berlandaskan beberapa kajian penelitian sebelumnya, diantaranya sebagai berikut :

1. Fransiskus G. Damanik (2010) melakukan penelitian pengaruh proses perlakuan panas *hardening*, *normalising*, dan *tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E. *Hardening* pada temperatur 910°C kemudian dilakukan lagi *tempering* dengan temperatur 650, 600, dan 550°C . Selanjutnya material tersebut didinginkan dengan laju pendinginan yang berbeda, pada *hardening* didinginkan dengan media oli dan *tempering* pada media udara. Berdasarkan hasil pengujian, baja AAR-M201 Grade E pada *hardening* pada temperatur 910° dilanjutkan *tempering* pada temperatur 600°C memiliki sifat mekanik yang memenuhi persyaratan standar baja AAR-M201 Grade E.
2. Aksa Setia Mukti (2010) melakukan penelitian mengenai pengaruh proses perlakuan panas *normalizing* dan pemanasan kembali dengan *annealing* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR-M201 Grade C untuk aplikasi *coupler yoke rotary*. Pada penelitian tersebut disimpulkan pada pemanasan *normalizing* pada temperatur 910°C dilanjutkan pemanasan kembali 650°C dengan waktu tahan masing-masing 60 menit dan perlakuan *annealing* pada 910°C menghasilkan sifat mekanik yang memenuhi



persyaratan selain itu struktur mikro yang diperoleh adalah ferit dan perlit.

3. Darmawan Alan Atari R (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur *annealing* terhadap perubahan sifat mekanik dan struktur mikro *Bolster* (AAR-M201 Grade D) dengan variasi temperatur *annealing* 650,800, dan 930°C dengan waktu tahan 60 menit. Berdasarkan penelitian tersebut disimpulkan bahwa pada perlakuan dengan temperatur *annealing* 800°C dan 930°C menghasilkan baja dengan sifat mekanik yang sesuai persyaratan, struktur mikro yang diperoleh adalah ferit dan perlit.
4. Arief Dwi Hermawan (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh temperatur *normalizing* pada sifat mekanik dan struktur mikro *Bolster* AAR-M201 Grade B, dengan variasi temperatur *normalizing* 860,895,930,dan 965°C, dari penelitan tersebut disimpulkan pada temperatur *normalizing* 860 sampai 930°C menghasilkan sifat mekanik yang memenuhi persyaratan dan struktur mikro yang dihasilkan adalah ferit dan perlit.
5. Jin Huang dkk. (2013) melakukan investigasi kegagalan pada *steel knuckle* yang terbuat dari baja AAR-M201 Grade E. Pada proses perlakuan panas yang dilakukan, baja ini pada awalnya dinormalisasi pada 900-920°C selama 3,5-4 jam dan didinginkan diudara. kemudian dipanaskan sampai 870-880°C dan waktu tahan selama 3-3,5 jam, di-*quenched* diair, dan diikuti tempering pada 510-550°C selama 3,5-4 jam. Pada analisa penyebab kegagalan, sifat mekanis *steel knuckle* tidak memenuhi standar baja AAR-M201, khususnya pada elongasi dan ketangguhan impak *Charpy*.
6. Mochammad Ghulam Isaq Khan (2015) melakukan penelitian tugas akhir mengenai pengaruh temperature tempering terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja aar-m201 grade E. pada erlakuan panas yang dilakukan pada



hardening 925°C selama 45 menit lalu didinginkan dengan media air, dan diikuti tempering pada $625-675^{\circ}\text{C}$ lalu didinginkan di udara terbuka. Penelitian ini menghasilkan struktur mikro yaitu bainit temper, berupa ferit dan karbida sementit (Fe_3C). Peningkatan temperatur tempering, menurunkan kekuatan luluh, kekuatan maksimum, kekerasan dan meningkatkan keuletan dan energi impak.

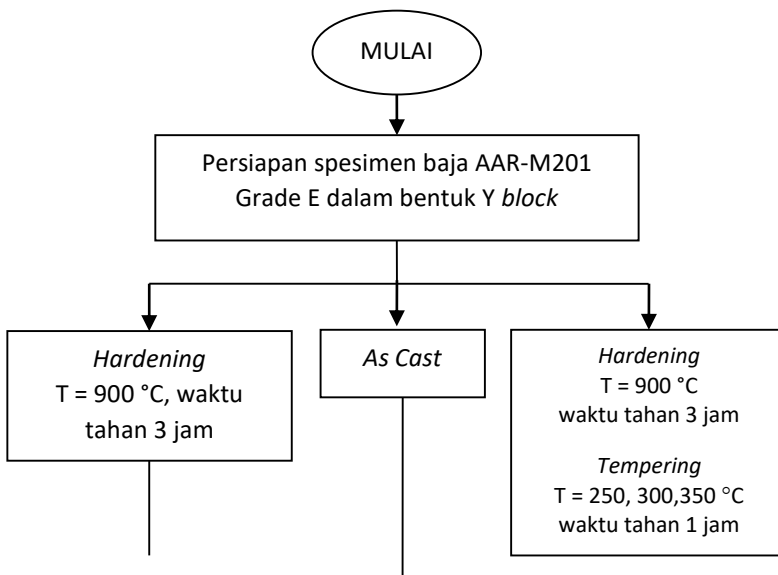
(halaman ini sengaja dikosongkan)



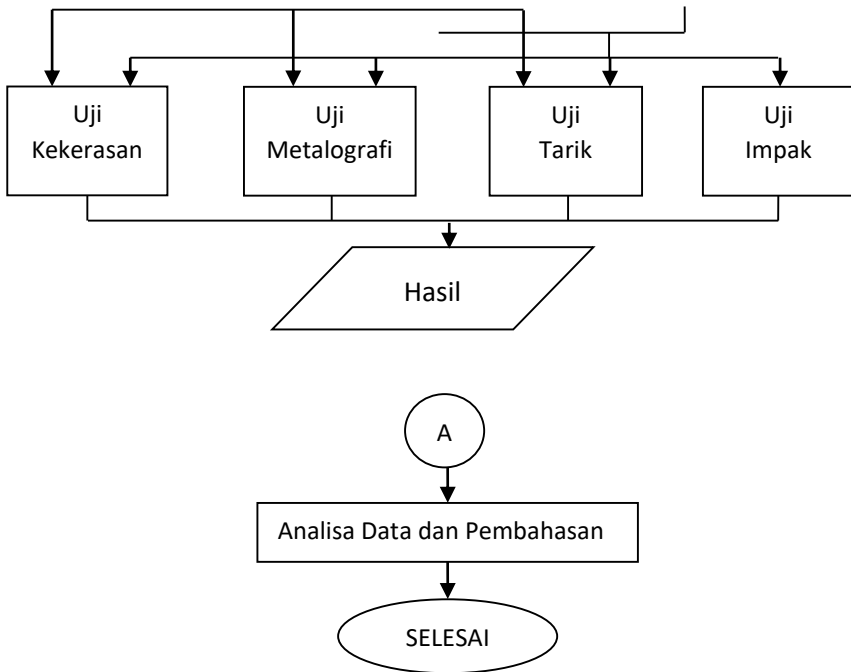
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah penelitian dari awal hingga selesai dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut:



*Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi*



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Metodologi Penulisan

Metode yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah studi lapangan, pengujian, dan studi literature. Dalam proses mempelajari serta mengumpulkan informasi mengenai komponen alat maupun tentang riwayat inspeksi dan kegagalan peneliti dibimbing oleh pembimbing lapangan di PT BARATA kemudian proses terakhir akan dilakukan analisis data secara komprehensif.

3.3 Bahan Penelitian



Dalam penelitian ini langkah pertama sebelum mempersiapkan pengujian adalah pengambilan spesimen yang akan diteliti di PT. BARATA. Bahan yang digunakan pada penelitian yaitu bagian *Coupler Yoke Rotary* (baja cor AAR-M201 Grade E), dengan komposisi kimia yang ditunjukkan pada table 3.1.

Tabel 3.1 Komposisi kimia AAR-M201 Grade E

Element	Chemical Composition (%)
Carbon, maks 0,32	0,24
Silicon, maks 1,50	0,49
Mangan, maks 1,85	1,6
Phospor, maks 0,04	0,03
Sulfur, maks 0,04	0,007
Crom	0,12
Nickel	0,28
Molybden	0,18
Cuprum	0,045



Aluminium	0,008
Fe	<i>Balance</i>
Ce, maks 0,88	0,67

3.4 Peralatan Penelitian

Peralatan penelitian yang digunakan sebagai berikut:

1. Dapur Pemanas

Dapur pemanas yang digunakan adalah *dielectric heating furnace* dengan kapasitas 400V/60 Hz dan pemanasan maksimum 1280°C.

2. Mesin Uji Tarik

Mesin uji tarik yang digunakan adalah *Universal Testing Machine* MFL System tipe UPD-20 dengan kapasitas maksimum 200 kN.

3. Mesin Uji Kekerasan

Mesin uji kekerasan yang digunakan adalah *Universal Hardness Tester* HBRV seri 187.52 dengan kapasitas pembebanan maksimum 1000 kgf.

4. Mesin Uji Impak

Mesin uji impak yang digunakan adalah mesin uji impak *Charpy Karl Frank/ 580 M*.

5. Mikroskop Optik

Mikroskop optik yang digunakan adalah mikroskop optik *Olympus* seri GX71 dengan perbesaran maksimum 1000 X.



6. Mikroskop Stereo

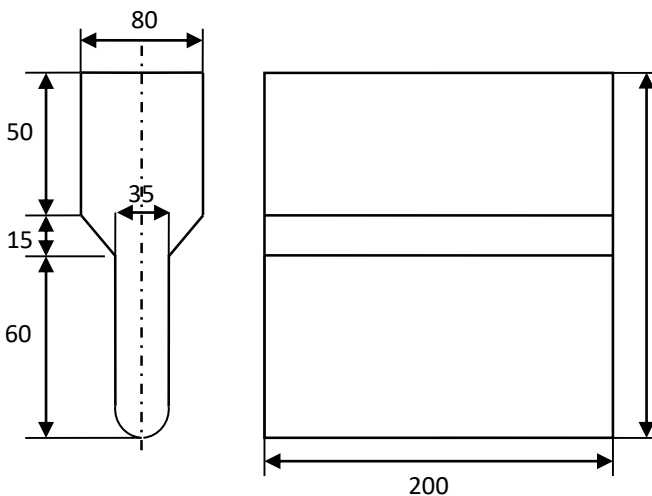
Mikroskop stereo yang digunakan adalah mikroskop stereo merk *Carl Zeiss Stemi DV 4*.

7. Peralatan lain-lain seperti gerinda, gergaji, jangka sorong, mesin polis, mesin bubut, dan termometer.

3.5 Metode Penelitian

3.5.1 Persiapan Spesimen

Sampel uji baja AAR-MA201 Grade E mengacu pada standar JIS 5101 untuk *steel casting* berupa *Y-block*. Gambar skematik spesimen seperti pada Gambar 3.2.





Gambar 3.2 Skematik Y-block baja AAR-M201 Grade E
(*satuan dalam mm)

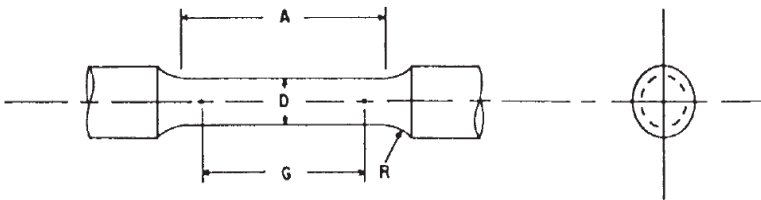
3.5.2 Perlakuan Panas pada Spesimen

Perlakuan panas dilakukan dengan melakukan pemanasan pada temperatur 900°C selama 3 jam kemudian didinginkan cepat dengan media air, lalu dilakukan pemanasan kembali (*tempering*) pada temperatur 250, 300, dan 350°C, ditahan selama 1 jam dan didinginkan di media udara. Langkah-langkah perlakuan panas pada spesimen sebagai berikut:

1. Menyiapkan Y-block baja AAR-M201 Grade E dengan kondisi belum mengalami perlakuan panas.
2. Memotong Y-block menjadi 9 buah spesimen, 27 buah spesimen uji impak.
3. Melakukan proses perlakuan panas pada setiap spesimen, sesuai prosedur.
4. Setelah proses perlakuan panas selesai, spesimen dikeluarkan untuk dilakukan pendinginan.

3.5.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik digunakan untuk mengetahui sifat mekanik baja AAR-M201 Grade E awal dan setelah dilakukan proses perlakuan panas. Sifat mekanis yang akan ditinjau adalah kekuatan luluh, kekuatan maksimum (*Ultimate Tensile Strength*), elongasi, dan reduksi area. Pengujian tarik berdasarkan ASTM E8M *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, spesifikasi spesimen yang digunakan seperti pada Gambar 3.3 dan Tabel 3.2.



Gambar 3.3 Spesimen uji tarik (ASTM, E8M)

Tabel 3.2 Dimensi Spesimen Uji Tarik

Bagian	Ukuran (mm)
<i>G – Gage length</i>	$50,0 \pm 0,10$
<i>D - Diameter</i>	$12,5 \pm 0,25$
<i>R – Radius of fillet</i>	10
<i>A – Lenth of reduced section, min</i>	60

Langkah-langkah pengujian tarik untuk baja AAR-M201 Grade E sebagai berikut,

1. Menyiapkan 1 buah spesimen tanpa perlakuan, dan 4 buah spesimen untuk masing-masing perlakuan panas (variasi temperatur *tempering*).
2. Membersihkan seluruh spesimen dengan kertas gosok grid 250 untuk mengantisipasi adanya pengotor yang menempel pada permukaan spesimen.
3. Melakukan pengujian tarik pada masing-masing spesimen.
4. Menganalisa hasil kurva $P-\Delta l$
5. Mengukur panjang akhir patahan, untuk menentukan elongasi.



6. Mengitung luas akhir penampang patahan, untuk menentukan reduksi area.

3.5.4 Pengujian Kekerasan

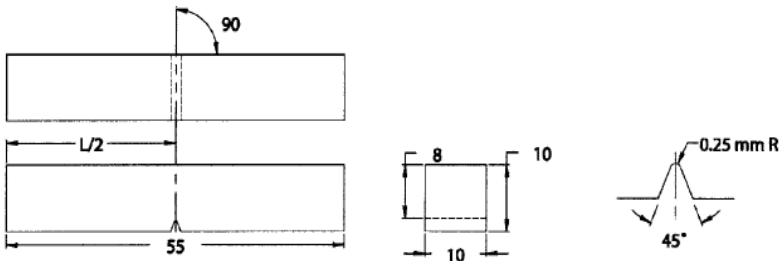
Pengujian kekerasan digunakan untuk menentukan kekerasan baja AAR-M201 Grade E awal dan setelah dilakukan proses perlakuan panas. Pengujian kekerasan yang digunakan menggunakan metode Brinell dengan menggunakan standar ASTM E10 *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*.

Spesifikasi pengujian yang digunakan sebagai berikut,

Indentor	: Bola baja yang dikeraskan
Beban Uji	: 187,5 kgf
Waktu indentasi	: 10 detik
Satuan uji	: BHN

3.5.5 Pengujian Impak

Pengujian impak digunakan untuk mengetahui berapa energi yang dibutuhkan untuk mematahkan benda kerja/spesimen. Pengujian impak yang dilakukan menggunakan metode Charpy sesuai standar ASTM E-23 *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. Mengacu pada standar baja AAR-M201 Grade E maka pengujian dilakukan pada temperatur - 40°C. Spesimen uji yang digunakan pada uji impak seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Spesimen uji impact (ASTM, E-23)

Langkah-langkah pengujian uji impact sebagai berikut,

1. Membersihkan seluruh spesimen dengan kertas gosok untuk menghilangkan kotoran yang menempel pada permukaan spesimen.
2. Mengondisikan temperatur seluruh spesimen menjadi -40°C .
3. Melakukan uji impact setiap spesimen untuk diketahui energi impact.
4. Mencatat energi impact yang digunakan untuk mematahkan spesimen.

3.5.6 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro (Metalografi) dilakukan untuk mengetahui struktur mikro yang terbentuk sehingga dapat digunakan untuk analisis proses dan sifat mekanik. Standar yang digunakan untuk preparasi spesimen adalah ASTM E3 (*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*) Langkah-langkah pengujian struktur mikro sebagai berikut:

1. Spesimen yang digunakan adalah spesimen untuk pengujian kekerasan.
2. Spesimen digosok dengan kertas gosok, mulai grid 200 sampai 1200.
3. Melakukan pemolesan dengan menggunakan alumina.



4. Mengambil spesimen kemudian melakukan etsa dengan pikral selama 2-10 detik, dengan komposisi larutan etsa seperti pada Tabel 3.3.
5. Melakukan pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik dengan perbesaran 200-1000 X
6. Melakukan pengamatan struktur mikro yang terbentuk.

Tabel 3.3 Komposisi Etsa Pikral (ASTM, E3)

Nama Etsa	Komposisi
Pikral	4 gram <i>picric acid</i> ($(\text{NO}_2)_3\text{C}_6\text{H}_2\text{OH}$) 100 mL ethanol



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



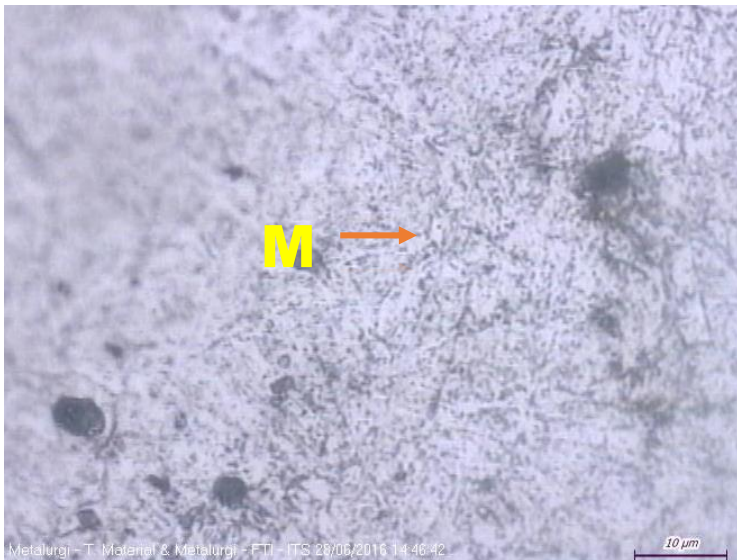
BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Struktur Mikro

Struktur mikro pada baja AAR-M201 Grade E yang diberikan perlakuan *hardening* dengan temperatur austenisasi 900°C, waktu tahan 3 jam, dan media pendingin air seperti pada Gambar 4.1. Struktur yang terbentuk adalah martensit (M).



Gambar 4. 1 Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah hardening dengan temperatur 900°C. Dietsa meggunakan pikral, perbesaran 1000x.

Struktur mikro pada baja AAR-M201 Grade E yang diberikan perlakuan *hardening* dengan temperatur austenisasi



900°C, waktu tahan 3 jam, dan media pendingin air, kemudian dilanjutkan dengan perlakuan *tempering* dengan 3 variasi temperatur yang berbeda yaitu temperatur 250°C, 300°C, dan 350°C dengan waktu tahan yang sama yaitu 1 jam.

Variasi pertama, perlakuan *tempering* dengan temperatur 250°C dan waktu tahan 1 jam seperti pada Gambar 4.2. Struktur mikro yang terbentuk adalah *upper bainit* (UB).



Gambar 4. 2 Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah perlakuan hardening – tempering dengan temperatur 250°C.

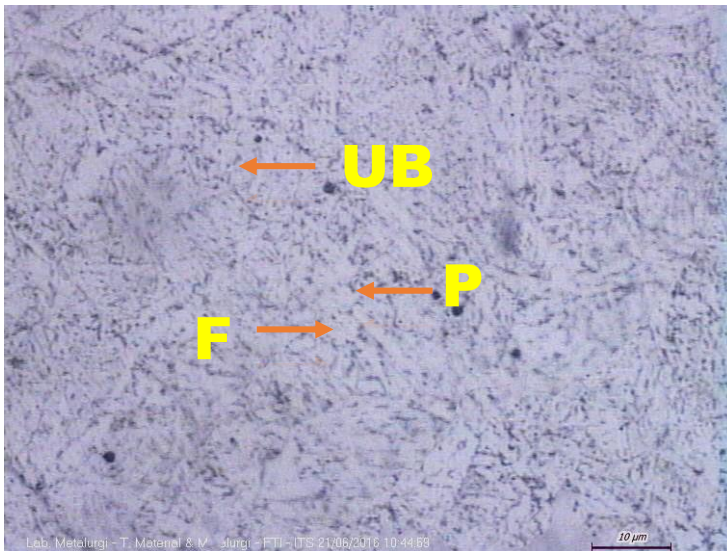
Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x.

Variasi kedua, perlakuan *tempering* dengan temperatur 300°C dan waktu tahan 1 jam seperti pada Gambar 4.3. Struktur mikro yang terbentuk adalah *upper bainit*. Butir-butir yang dihasilkan lebih kasar seiring dengan naiknya temperatur *tempering*.



Gambar 4. 3 Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah perlakuan hardening – tempering dengan temperatur 300°C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x.

Variasi ketiga, perlakuan *tempering* dengan temperatur 350°C dan waktu tahan 1 jam seperti pada Gambar 4.4. Struktur yang terbentuk terdiri dari beberapa fasa yang berbeda, yaitu kombinasi antara ferrit-perlit (F-P) dan bainit temper.

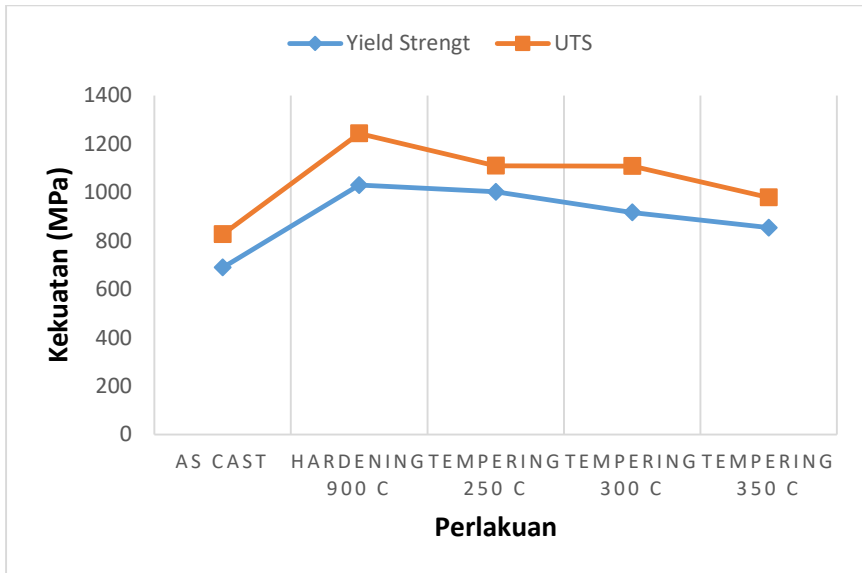


Gambar 4. 4 Struktur mikro baja AAR-M201 Grade E setelah perlakuan hardening – tempering dengan temperatur 350°C. Dietsa menggunakan pikral, perbesaran 1000x.

Struktur yang dihasilkan berbeda dari dua variasi sebelumnya dimana muncul fasa ferrit-perlit seiring bertambahnya temperatur *tempering*.

4.1.2 Pengujian Tarik

Sifat mekanik material dapat diketahui dengan melakukan pengujian tarik. Hasil dari pengujian tarik dihasilkan nilai kekuatan maksimum dan kekuatan luluh. Persentase elongasi dan reduksi area yang terjadi pada material setelah dilakukan pengujian tarik dapat diperhitungkan untuk menghasilkan nilai keuletan material.



Gambar 4.5 Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekuatan luluh dan kekuatan maksimum

Pada gambar 4.5, ditunjukkan hubungan perlakuan spesimen AAR-M201 Grade E, terhadap kekuatan luluh dan kekuatan maksimum terbesar diperoleh pada spesimen yang mengalami perlakuan *hardening-tempering* dengan temperatur tempering 250°C, 300°C, dan 350°C.



Tabel 4.1 Nilai kekuatan tarik maksimum dan kekuatan luluh akibat perlakuan panas baja AAR M-201 Grade E

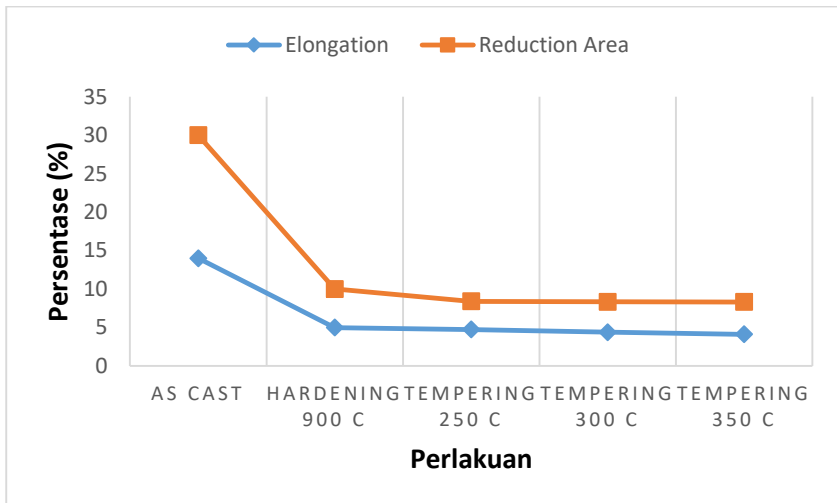
Perlakuan	Yield Strengt (MPa)	UTS (MPa)
As Cast	689,47	827,37
Hardening (900 ⁰ C)	1030	1243,31
Hardening (900 ⁰ C) Tempering (250 ⁰ C)	1002,08	1110,4
Hardening (900 ⁰ C) Tempering (300 ⁰ C)	917,29	1108,74
Hardening (900 ⁰ C) Tempering (350 ⁰ C)	854,53	979,16

Berdasarkan spesifikasi American Association of Railroads (AAR), spesifikasi minimum kekuatan yang harus dimiliki oleh baja AAR M-201 Grade E adalah sebesar 689,476 MPa untuk kekuatan luluh dan 827,371 MPa untuk kekuatan maksimum. Proses perlakuan yang dilakukan menghasilkan kekuatan sesuai spesifikasi standar minimum standar AAR.

Keuletan menyatakan kemampuan suatu material untuk berdeformasi plastis tanpa terjadi patah. Nilai keuletan material dapat ditinjau dari persentase elongasi dan reduksi area. Pada Gambar 4.6, ditunjukkan hubungan perlakuan spesimen AAR-



M201 Grade E terhadap keuletan (persen elongasi dan reduksi area).



Gambar 4. 6 Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap persen elongasi dan reduksi area

Berdasarkan spesifikasi American Association of Railroads (AAR), spesifikasi minimum keuletan baja AAR M-201 Grade E adalah memiliki elongasi minimal 14% dan reduksi area minimal 30%. Dari ketiga perlakuan yang dilakukan, tidak ada yang memenuhi spesifikasi minimum standar AAR. Elongasi dan reduksi area spesimen *hardening-tempering* pada temperatur 250°C, 300°C, dan 350°C memiliki nilai yang kurang dari spesifikasi minimum.

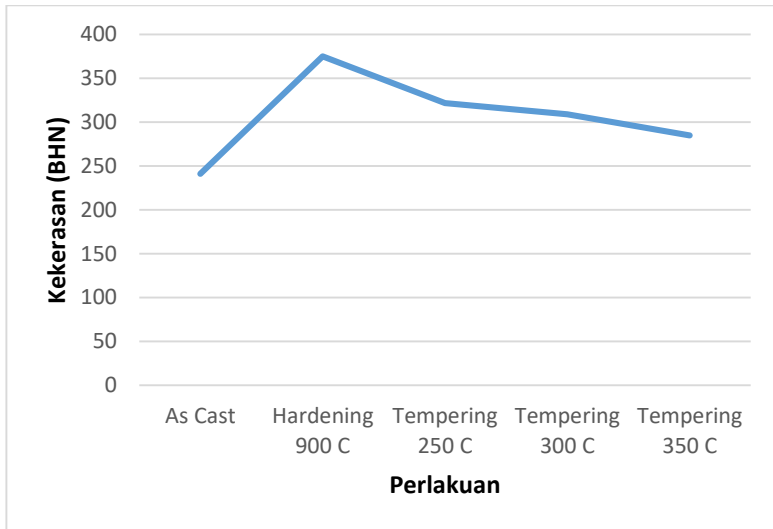


Tabel 4.2 Nilai penambahan panjang dan pengecilan penampang akibat perlakuan panas baja AAR M-201 Grade E

Perlakuan	ELONGATION (%)	REDUCTION AREA (%)
As Cast	14	30
Hardening (900 ⁰ C)	5	10
Hardening (900 ⁰ C) Tempering (250 ⁰ C)	4,75	8,41
Hardening (900 ⁰ C) Tempering (300 ⁰ C)	4,4	8,35
Hardening (900 ⁰ C) Tempering (350 ⁰ C)	4,13	8,33

4.1.3 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dapat menghasilkan kemampuan material untuk menahan goresan dan tusukan/indentasi. Pengujian ini memperhitungkan nilai dari komposisi terutama kadar karbon dan struktur mikro yang terbentuk dimana kedua hal tersebut adalah yang mempengaruhi dari nilai kekerasan material.



Gambar 4.7 Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekerasan (BHN)

Pada gambar 4.7 ditunjukkan hubungan perlakuan spesimen AAR-M201 Grade E terhadap kekerasan, yang ditunjukkan dalam skala BHN. Terlihat kekerasan terbesar diperoleh saat spesimen di hardening dan nilainya menurun ketika diberi perlakuan tempering. Penurunan nilai kekerasan seiring dengan meningkatnya temperatur tempering.



Tabel 4.3 Nilai kekerasan akibat perlakuan panas baja AAR M-201 Grade E

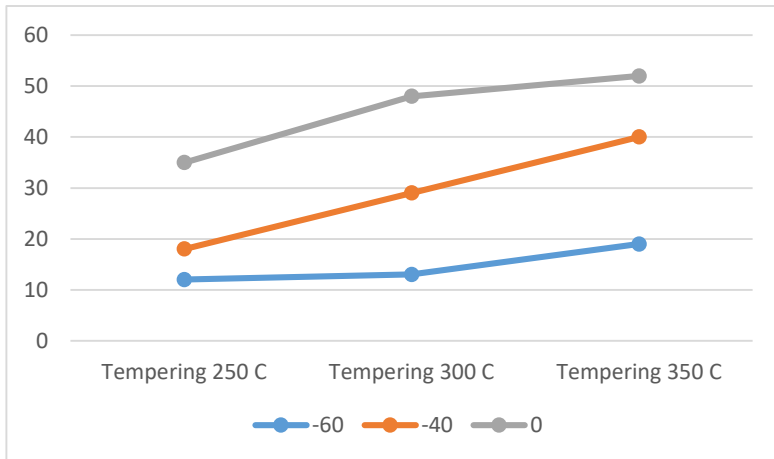
Perlakuan	kekerasan (bhn)
As Cast	241
Hardening (900 ⁰ C)	375
Hardening (900 ⁰ C) Tempering (250 ⁰ C)	322
Hardening (900 ⁰ c) Tempering (300 ⁰ c)	309
Hardening (900 ⁰ c) Tempering (350 ⁰ c)	285

4.1.4 Pengujian Impact

Kekuatan impak merupakan ketahanan suatu material terhadap beban pukulan (*impact*) yang dinyatakan dengan besar energi yang diperlukan untuk mematahkan suatu material. Energi impak memberi suatu indikasi yang baik pada energi yang diperlukan untuk inisiasi dan penjalaran suatu retak. Kekuatan impak menunjukkan salah satu sifat mekanik material, yaitu ketangguhan.



Pada Gambar 4.7, ditunjukkan hubungan perlakuan spesimen baja AAR-M201 Grade E terhadap energi impact pada berbagai temperatur. Pengujian dilakukan pada temperatur 0°C, -40°C, dan -60°C.



Gambar 4. 8 Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekuatan impact pada berbagai temperatur (0°C, -40°C, -60°C)

Pada temperatur 0°C, kekuatan impact paling tinggi dimiliki oleh spesimen *hardening-tempering* 350°C dengan nilai energi impact sebesar 52 Joule, diikuti oleh spesimen *hardening-tempering* 300°C dan spesimen *hardening-tempering* 250°C dengan nilai energi impact sebesar 48 Joule dan 35 Joule. Pada temperatur -40°C, spesimen *hardening-tempering* 350°C memiliki kekuatan impact paling tinggi, sebesar 40 Joule, disusul spesimen *hardening-tempering* 300°C, sebesar 29 Joule, dan paling rendah adalah spesimen *hardening-tempering* 250°C dengan energi impact sebesar 18 Joule. Pada temperatur -60°C, kekuatan impact paling tinggi dimiliki oleh spesimen *hardening-tempering* 350°C, diikuti spesimen *hardening-tempering* 300°C, dan spesimen

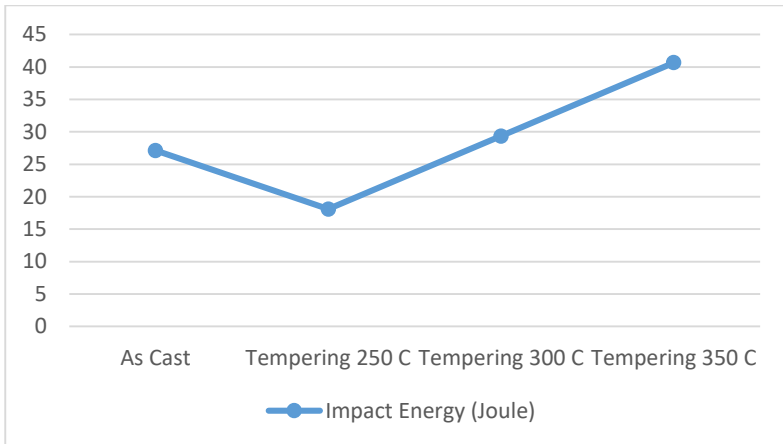


hardening-tempering 250°C dengan nilai masing-masing 19 Joule, 13 Joule, dan 12 Joule.

Tabel 4.4 Nilai energi impak pada kondisi perlakuan panas baja AAR M-201 Grade E

Perlakuan	Energi Impact pada variasi temperate (Joule)		
	-60°C	-40°C	0°C
Hardening (900°C)	12	18	35
Tempering (250°C)			
Hardening (900°C)	13	29	48
Tempering (300°C)			
Hardening (900°C)	19	40	52
Tempering (350°C)			

Berdasarkan spesifikasi America Association of Railroads (AAR), energi impak minimum yang harus dimiliki oleh baja AAR M-201 Grade E adalah sebesar 27,116 Joule pada temperatur -40°C.



Gambar 4. 9 Pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekuatan impak pada temperatur -40°C

Spesimen yang tidak memenuhi standar AAR adalah spesimen *hardening-tempering* pada temperatur 250°C dengan kekuatan impak sebesar 18 Joule.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pengaruh Temperatur Tempering terhadap Struktur Mikro Baja AAR-M201 Grade E

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh temperatur tempering terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja AAR M-201 Grade E. Spesimen diberi perlakuan *hardening – tempering*. Digunakan parameter *hardening* yang sama pada ketiga spesimen yaitu dengan temperatur austenisasi 900°C , waktu tahan 3 jam, dan media pendingin menggunakan air. Masing-masing spesimen kemudian di temper dengan variasi temperatur yang berbeda, yaitu 250°C , 300°C , dan 350°C dengan waktu tahan yang sama, yaitu 1 jam.



Pada pengamatan struktur mikro, struktur mikro yang terbentuk setelah proses *hardening* adalah martensit. Struktur mikro ini muncul akibat perlakuan *hardening* mencapai temperatur austenisasi 900°C lalu dilakukan pendingin cepat sehingga menghasilkan transformasi fasa dari fasa austenite menjadi fasa martensit.

Pada pengamatan selanjutnya setelah proses *hardening* dilanjutkan dengan proses *tempering* dengan pemberian tiga variasi temperatur yang berbeda. Baja AAR M-201 Grade E mengalami proses *tempering* dengan variasi temperatur yang berbeda menghasilkan struktur mikro yang berbeda. Proses *tempering* pada temperatur 250°C menghasilkan struktur mikro *upper bainit*. Proses *tempering* pada temperatur 300°C menghasilkan struktur mikro *upper bainit* dengan butir yang lebih kasar. Proses *tempering* pada temperatur 350°C menghasilkan struktur mikro *upper bainit* disertai ferit dan perlit. Hal ini sesuai dengan diagram *continuous cooling transformation* (CCT) yang menyatakan bahwa variasi temperatur *tempering* menghasilkan perbedaan fasa hasil transformasi. (Callister, 2009)

Setelah proses *tempering* terdapat struktur *upper bainit* pada ketiga variasi. *Upper bainit* adalah struktur yang terbentuk ketika baja mengalami proses *tempering* pada daerah temperatur antara 250°C – 400°C. Daerah temperatur ini juga merupakan daerah temperatur transformasi austenit menjadi bainit. (Suherman, 2001). Struktur *upper bainit* yang dihasilkan muncul akibat temperatur *tempering* yang relatif tinggi menyebabkan terjadinya *recovery*, menghilangkan batas butir diantara bilah-bilah yang mempunyai sudut yang kecil, menyebabkan bilah-bilah yang berdekatan saling menyatu, sehingga strukturnya menjadi lebih kasar (Li, et al., 2012).

4.2.2 Pengaruh Temperatur Tempering terhadap Sifat Mekanik Baja AAR-M201 Grade E



Sifat mekanik baja dipengaruhi oleh komposisi kimia dan struktur mikro yang dimilikinya. Dalam penelitian ini, sifat mekanik yang ditinjau adalah kekuatan, keuletan, kekerasan, dan ketangguhan. Penelitian ini menggunakan spesimen dengan komposisi kimia yang sama namun dengan perlakuan panas yang berbeda. Spesimen diberikan perlakuan *hardening-tempering*, masing-masing pada temperatur 250°C, 300°C, 350°C. Perbedaan perlakuan panas yang diterima spesimen menyebabkan struktur mikro yang berbeda, sehingga sifat mekaniknya pun berbeda.

Proses perlakuan panas *tempering* baja AAR M-201 Grade E dilakukan untuk memperbaiki sifat mekanik setelah *hardening*. Pengamatan dari Gambar 4.5 nilai kekuatan luluh *as cast* 689,47 MPa dengan kekuatan maksimum 827,37 MPa. Lalu dilakukan perlakuan *hardening* dengan pendinginan air dimana menghasilkan kenaikan kekuatan luluh sebesar 1030 MPa dengan kekuatan maksimum 1243,31 MPa. Hal ini disebabkan oleh terjadinya transformasi fasa dari fasa austenite menjadi fasa martensit. Pada saat dilakukan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 250°C, terjadi penurunan kekuatan luluh menjadi 1002,08 MPa dan kekuatan maksimum 1110,4 Mpa. Hal ini disebabkan terjadinya perubahan fasa martensit menjadi *upper bainit*. Pada saat dilakukan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 300°C, terjadi penurunan kekuatan luluh menjadi 917,29 MPa dan kekuatan maksimum 1108,74 Mpa. Hal ini disebabkan butir-butir dari fasa *upper bainit* semakin kasar akibat peningkatan temperatur *tempering*. Pada saat dilakukan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 350°C, terjadi penurunan kekuatan luluh menjadi 854,53 MPa dan kekuatan maksimum 979,16 Mpa. Hal ini disebabkan oleh mulai munculnya ferit dan perlit menghasilkan kombinasi fasa *upper bainit* dan ferit-perlit. Proses perlakuan panas menyebabkan perubahan kekuatan luluh dan kekuatan maksimal material.

Pengamatan dari gambar 4.6 dengan nilai persentase elongasi *as cast* sebesar 14% dan persentase reduksi area 30%.



Lalu dilakukan perlakuan *hardening* dengan pendinginan air dimana menghasilkan penurunan nilai persentase elongasi sebesar 5% dan persentase reduksi area 10%. Hal ini disebabkan oleh terjadinya transformasi fasa dari fasa austenite menjadi fasa martensit. Pada saat dilakukan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 250°C, terjadi penurunan nilai elongasi sebesar 4,75% dan nilai reduksi area 8,41%. Hal ini disebabkan terjadinya perubahan fasa martensit menjadi *upper* bainit. Pada saat dilakukan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 300°C, terjadi penurunan nilai elongasi sebesar 4,4% dan nilai reduksi area 8,41%. Hal ini disebabkan butir-butir dari fasa *upper* bainit semakin kasar akibat peningkatan temperatur *tempering*. Pada saat dilakukan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 350°C, terjadi penurunan nilai elongasi sebesar 4,13% dan nilai reduksi area 8,33%. Hal ini disebabkan oleh mulai muncul ferit dan perlit menghasilkan kombinasi fasa *upper* bainit dan ferit-perlit. Proses perlakuan panas menyebabkan perubahan nilai elongasi dan nilai reduksi area material.

Pengamatan dari gambar 4.7 dengan nilai kekerasan pada *as cast* adalah 241 BHN. Lalu dilakukan perlakuan *hardening* dengan pendinginan air dimana menghasilkan peningkatan kekerasan menjadi 375 BHN. Hal ini disebabkan oleh terjadinya transformasi fasa dari fasa austenite menjadi fasa martensit. Pada saat dilakukan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 250°C, terjadi penurunan kekerasan menjadi 322 BHN. Hal ini disebabkan terjadinya perubahan fasa martensit menjadi *upper* bainit. Pada saat dilakukan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 300°C, terjadi penurunan kekerasan menjadi 309 BHN. Hal ini disebabkan butir-butir dari fasa *upper* bainit semakin kasar akibat peningkatan temperatur *tempering*. Pada saat dilakukan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 350°C, terjadi penurunan kekerasan menjadi 285 BHN. Hal ini disebabkan oleh mulai muncul ferit dan perlit menghasilkan kombinasi fasa *upper*



bainit dan ferit-perlit. Proses perlakuan panas menyebabkan perubahan kekerasan material.

Pengamatan dari gambar 4.8 didapatkan pengaruh kondisi perlakuan baja AAR M-201 Grade E terhadap kekuatan impact pada berbagai temperatur. Material yang telah diberikan perlakuan *hardening* dengan temperatur 900°C dilanjutkan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 250°C menghasilkan energi *impact* 12 joule pada temperatur -60°C, 18 joule pada temperatur -40°C, dan 35 joule pada temperatur -0°C. Material yang telah diberikan perlakuan *hardening* dengan temperatur 900°C dilanjutkan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 300°C menghasilkan energi *impact* 13 joule pada temperatur -60°C, 29 joule pada temperatur -40°C, dan 48 joule pada temperatur -0°C. Material yang telah diberikan perlakuan *hardening* dengan temperatur 900°C dilanjutkan proses *tempering* dengan temperatur *tempering* 350°C menghasilkan energi *impact* 19 joule pada temperatur -60°C, 40 joule pada temperatur -40°C, dan 52 joule pada temperatur -0°C. Pengaruh temperatur *tempering* mempengaruhi energi impact material. Hal ini disebabkan oleh terjadinya perubahan fasa dan struktur menjadi kasar akibat peningkatan temperatur *tempering*.

Adanya unsur paduan meningkatkan *hardenability* baja. Selain itu, unsur paduan menghambat penurunan kekerasan pada saat *tempering*, terutama pada *tempering* temperatur tinggi. Unsur paduan kromium (Cr) dan molibden (Mo) meningkatkan kekerasan dan mencegah penurunan kekerasan dengan membentuk presipitasi karbida. Unsur paduan mangan (Mn) dan nikel (Ni) meningkatkan kekerasan melalui *solid-solution hardening* pada ferrit. Namun peningkatannya tidak terlalu signifikan bila dibandingkan dengan unsur paduan pembentuk karbida (_____, ASM Handbook vol. 4: Heat Treating, 2004). Pelarutan kembali unsur paduan pada temperatur *tempering* yang tinggi menyebabkan penguatan oleh unsur paduan menjadi tidak berarti. Ditambah, presentase unsur paduan dalam baja spesimen



cukup rendah sehingga penurunan kekerasan yang terjadi pada saat tempering cukup besar, dan terus menurun seiring dengan kenaikan temperatur tempering.

Kekerasan dan kekuatan baja hasil tempering terus menurun seiring dengan kenaikan temperatur yang digunakan pada proses tempering. Keuletan, dilihat dari elongasi dan reduksi area, meningkat secara kontinyu dengan naiknya temperatur tempering. Ketangguhan, dilihat dari kekuatan impak, mengalami peningkatan ataupun penurunan tergantung dari temperatur tempering. Tempering pada temperatur sekitar 300°C menyebabkan penurunan ketangguhan, sedangkan tempering diatas temperatur 320°C meningkatkan ketangguhan. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian. Dengan naiknya temperatur tempering, terjadi peurunan kekuatan luluh, kekuatan maksimum, dan kekerasan, serta terjadi peningkatan elongasi, reduksi area, dan kekuatan impak. (_____, ASM Handbook vol. 4: Heat Treating, 2004)



BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian yang telah dilakukan tentang Analisis pengaruh temperatur *tempering* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik pada baja AAR-M201 Grade E, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut

1. Temperatur *tempering* mempengaruhi struktur mikro pada baja AAR-M201 Grade E. Hasil dari proses *tempering* pada baja AAR-M201 Grade E pada temperatur 250°C menghasilkan struktur mikro *upper bainit*. Proses *tempering* pada temperatur 300°C menghasilkan struktur mikro *upper bainit* dengan butir yang lebih kasar. Proses *tempering* pada temperatur 350°C menghasilkan struktur mikro *upper bainit* disertai ferit dan perlit. Peningkatan temperatur *tempering* mengakibatkan struktur menjadi semakin kasar dan perubahan fasa.
2. Temperatur *tempering* mempengaruhi sifat mekanik baja AAR201 Grade E. Peningkatan temperatur *tempering* menurunkan kekuatan luluh, kekuatan maksimum, dan kekerasan serta meningkatkan keuletan dan energi impak. Perlakuan *hardening* selama 3 jam disertai *tempering* pada temperature 350°C selama 1 jam paling mendekati spesifikasi dari sifat mekanik pada baja AAR-M201 Grade E dengan nilai kekuatan luluh 854,53 MPa, kekuatan maksimum 979,16 MPa, persen elongasi 4,13%, dan reduksi area 8,33%.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil yang didapatkan maka saran-saran yang dapat diberikan, sebagai berikut:

1. Persiapan spesimen untuk pengujian harus mempunyai dimensi yang presisi sesuai standar yang digunakan, agar data yang didapat lebih akurat.



2. Perlu dilakukan evaluasi pada proses produksi baja, untuk menghindari adanya cacat (*defect*) pada baja.

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 1990. *Intermediate Direct Support and General Support Repair Parts and Special Tool List Unit*. Washington D.C.: HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF THE ARMY.
- _____. 2007. *Manual of Standards and Recommended Practices*. Washington D.C.: The Association of American Railroads.
- _____. 2004. *ASM Handbook vol. 4: Heat Treating*. ASM International.
- _____. 2004. *ASM Handbook vol. 9: Metallography and Microstructure*. ASM International.
- _____. 2010. *ASTM E10 : Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. ASTM International.
- _____. 2002. *ASTM E23 : Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
- _____. 2007. *ASTM E3 : Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. ASTM International.
- _____. 2007. *ASTM E8/E8M : Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
- Avner, Sidney. *Introduction to Physical Metallurgy*, Second Edition, McGraw-Hill International Book Company, Tokyo, 1974.
- Bramfitt. "Metallographer's Guide: Irons and Steels : Irons and Steels." 2002.
- Callister, William D., *Materials Science and Engineering*, eighth Edition, John Wiley & Sons Inc. New York, 2009.
- Clark, Donald S.; Varney, Willbur R., *Physical Metallurgy for Engineers*, Second Edition, Brooks/Cole Engineering, Monterey, California.

Thelning, Karl-Erik, Steel and Its Heat Treatment, Second Edition, Butterworths, London, 1984.

Seshu. "Failure Analisis of Railroad Couplers of AAR Type E." 2010.

Suherman, Wahid. "Perlakuan Panas". Institut Teknologi Sepuluh nopember. Surabaya. 2001.

Warmuzek. "Aluminum-silicon Casting Alloys: Atlas of Microfractographs". 2004.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Ditri Mahbegi, lahir di Lhokseumawe – Aceh Utara 27 November 1990. Merupakan putra ketiga dari pasangan Sentosa dan Anida Nuari. Penulis telah menempuh pendidikan formal, yaitu TK YPAA Aceh, SD Al-Alaq Asean Aceh, SMPS Al-Alaq Asean Aceh, SMA Muhammadiyah Rawamangun. Penulis mengikuti PMDK Mandiri dan di terima di Jurusan Teknik Material & Metalurgi FTI-ITS Surabaya pada tahun 2009 dengan NRP. 2709100014.

Semasa menjadi mahasiswa ITS penulis aktif dalam kegiatan organisasi perkumpulan daerah IMAJAS (Ikatan Mahasiswa Jakarta se-Surabaya). Pernah menjabat sebagai Staf Departemen Eksternal – IMAJAS. Aktif menjalankan bisnis kuliner menjabat sebagai *owner* dan *founder* Sabisih Cafe. Pengalaman kerja yang dimiliki penulis antara lain yaitu pada bulan Januari 2013 melakukan kerja praktek di PT. Krakatau Wajatama Indonesia.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)